



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## ZVÝŠENÍ ROČNÍHO VYUŽITÍ PARNÍHO PRÁŠKOVÉHO KOTLE K5 VE ŽŽDAS, A. S

INCREASING THE ANNUAL USE OF STEAM BOILERS K5 POWDER IN ŽŽDAS, A. S

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Kubiš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

BRNO 2017



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. David Kubiš**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Zvýšení ročního využití parního práškového kotle K5 ve ŽĐAS, a. s**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Teplárna ŽĐAS, a. s. má celkový instalovaný výkon kotlů 84,33 MW, (příkon 99,07 MW) s výrobou elektřiny o celkovém instalovaném výkonu 6,5 MW. Teplárna je kromě vykřívání vlastních energetických potřeb ŽĐAS, a. s. hlavním dodavatelem tepla pro horkovodní soustavu CZT SATT, a. s. zásobující teplem podstatnou část města. Teplárna dále dodává teplo prostřednictvím horkovodní sítě i několika dalším firmám umístěným v areálu ŽĐAS, a. s.

V kotelně jsou v současné době provozovány 4 parní vysokotlaké kotle. Kotel K3, Dukla se sníženým výkonem z 40 na 20 t/h, 15,7 MW, (příkon 22,4 MW), r. v. 1957 s přesuvným roštem, palivo hnědé uhlí. Kotel K5, Dukla se sníženým jmenovitým výkonem 54 t/h r. v. 1982, modernizace 2005 Invelt, granulační se 2 stabilizačními hořáky na ZP, palivo hnědé uhlí čisté, nebo ve směsi s agropeletami. Navrhněte vhodné úpravy turbíny a tepelného hospodářství pro vyšší roční využití kotle K5.

### **Cíle diplomové práce:**

- Omezit nutnost přejíždění kotle K5 na kotel K3 a zvýšit jeho časové využití v přechodném období pomocí ekonomicky únosného technického řešení.
- Chlazení zpáteční větve horkovodu s využitím stávajícího výměníku tepla 250 m<sup>2</sup> a chladicího okruhu TG.
- Kondenzace části páry z protitlaku TG4 v kondenzátoru odstavené kondenzačně odběrové turbíny AT6 Škoda Plzeň.
- Snížení minimálního výkonu kotle K5.
- Provoz s malou kondenzační turbínou.

**Seznam doporučené literatury:**

FIEDLER, J. Parní turbíny: návrh a výpočet. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 66 s. ISBN 80-214-2777-9.

KRBEK, J., B. POLESNÝ a J. FIEDLER. Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. ISBN 80-214-1334-4.

KADRNOŽKA, J. Tepelné turbíny a turbokompresory: základy teorie a výpočtů. Brno: CERM, 2004, 308 s. ISBN 80-720-4346-3.

ŠKOPEK, J. Parní turbína: tepelný a pevnostní výpočet. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007, 170 s., 54 s. příl. ISBN 978-80-7043-256-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá vyšším využitím kotle K5 v teplárně ŽĎAS, a.s. v přechodném období, kdy vlivem snížených odběrů dochází k přehřívání zpáteční větve horkovodu a je nutnost přejíždět na jiný kotel. Cílem práce je omezit přejíždění z kotle K5 na kotel K3 a zvýšit jeho časové využití v přechodném období pomocí ekonomicky únosného technického řešení. Na začátku práce je popsána teplárna ŽĎAS, a.s. a její vybavení. Následují čtyři metody výpočtů zvýšení ročního využití kotle K5. A to chlazení zpáteční větve s použitím výměníku tepla, kondenzace části páry z protitlaku TG4, snížení minimálního výkonu kotle K5 a provoz s malou kondenzační turbínou. Práce je zakončena srovnáním zmíněných metod a experimentem snížení minimálního výkonu.

## **Klíčová slova**

Teplárna ŽĎAS, a.s., kotel, chlazení horkovodu, kondenzace páry, snížení minimálního výkonu kotle, točivá redukce

## **Abstract**

This master's thesis deals with higher usage of boiler K5 in CHP plant ŽĎAS, a.s. in temporary season, when due to reduced consumption is overheating hot water return branch and there is need to change to another boiler. Main goal of thesis is reduce changes between boiler K5 and boiler K3 and increase usage of boiler K5 in temporary season by economic profitable technical solution. At the beginning of thesis is described CHP plant ŽĎAS, a.s. and its equipment. Next are four methods of calculation increase year's usage of boiler K5. And these are cooling hot water return branch using heat exchanger, condensation of part steam from back pressure, reduce minimal power of boiler K5 and usage with small condensing turbine. Thesis is finished with comparison of mentioned methods and experimental reduce of minimal power boiler K5.

## **Keywords**

CHP plant ŽĎAS, a.s., boiler, cooling hot water return branch, condensation of steam, reduce minimal power of boiler, micro turbine

### **Bibliografická citace**

KUBIŠ, D. *Zvýšení ročního využití parního práškového kotle K5 ve ŽĎAS, a. s.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Zvýšení ročního využití parního práškového kotle K5 ve ŽĐAS, a. s.* vypracoval samostatně, na základě odborných konzultací a s využitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci práce.

V Brně, dne 26.5.2017

.....

Bc. David Kubiš

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za odborné vedení a rady při vypracování této práce. Dále kolektivu z teplárny ŽĎAS, a.s. za odborné konzultace a připomínky k práci. Děkuji také svým rodičům, kteří mě během celého studia na vysoké škole podporovali.



## Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>1 Teplárna ŽĐAS, a.s.....</b>	<b>12</b>
1.1 Popis.....	12
1.2 Soustava CZT .....	13
1.3 Tepelné schéma teplárny .....	13
1.4 Kotel K5.....	15
1.5 Kotel K3.....	17
1.6 Kotel K7.....	18
1.7 Kotel K8.....	18
1.8 Turbogenerátor TG4 .....	19
1.9 Turbogenerátor TG3 .....	20
1.10 Turbogenerátor TG1.....	20
1.11 Výměníková stanice .....	21
1.12 Redukční stanice .....	21
1.13 Úprava vody .....	22
1.14 Palivo.....	22
<b>2 Stávající stav .....</b>	<b>23</b>
2.1 Popis.....	23
2.2 Roční využití kotle K5 .....	23
2.3 Výpočet tepla a výnosů.....	24
<b>3 Chlazení zpáteční větve horkovodu s využitím stávajícího výměníku tepla 250 m<sup>2</sup> a chladicího okruhu TG .....</b>	<b>28</b>
3.1 Popis.....	28
3.2 Bilanční schéma .....	28
3.3 Výpočet chladicího výkonu .....	30
3.4 Ekonomický výpočet .....	32
3.5 Zhodnocení .....	34
<b>4 Kondenzace části páry z protitlaku TG4 v kondenzátoru odstavené kondenzačně odběrové turbíny AT6 Škoda Plzeň.....</b>	<b>36</b>
4.1 Popis.....	36
4.2 Bilanční schéma .....	36
4.3 Výpočet množství páry puštěné do kondenzátoru a chladicího výkonu.....	38
4.4 Ekonomický výpočet .....	41
4.5 Zhodnocení .....	42
<b>5 Snížení minimálního výkonu kotle K5 .....</b>	<b>44</b>

5.1	Popis .....	44
5.2	Bilanční schéma .....	44
5.3	Výpočet sníženého výkonu kotle a elektrického výkonu .....	45
5.4	Ekonomický výpočet .....	48
5.5	Zhodnocení .....	51
<b>6</b>	<b>Provoz s malou kondenzační turbínou .....</b>	<b>52</b>
6.1	Popis .....	52
6.2	Bilanční schéma .....	52
6.3	Výpočet elektrického výkonu turbíny a chladicího výkonu kondenzátoru .....	54
6.4	Ekonomický výpočet .....	57
6.5	Návratnost investice .....	59
6.6	Zhodnocení .....	60
<b>7</b>	<b>Srovnání metod zvýšení ročního využití kotle K5 .....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>Experimentální snížení minimálního výkonu kotle K5 .....</b>	<b>64</b>
	<b>Závěr .....</b>	<b>65</b>
	<b>Zdroje .....</b>	<b>66</b>
	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	67
	Seznam příloh .....	67
	Přílohy .....	68

## Úvod

Teplárny slouží k výrobě tepla a elektrické energie. Hlavním produktem tepláren je vyrobené teplo v závislosti na potřebách odběřů zákazníků. Toto teplo je z teplárny vyvedeno ve formě páry nebo horké vody. Vhodnější je použití horkovodů, protože tepelné ztráty jsou nižší než při použití parovodů. Sekundární produkt tepláren je vyrobená elektrická energie, která je závislá na vyrobeném množství páry. Elektrická energie vyrobená na turbíně závisí na parametrech páry před a za turbínou a množství páry, které v turbíně expanduje.

Teplárna ŽĎAS, a.s. je hlavním dodavatelem tepla pro město Žďár nad Sázavou a firmy umístěné v areálu ŽĎAS, a.s.. Elektřina vyrobená v teplárně primárně slouží pro pokrytí vlastní spotřeby a nadbytek je prodáván firmám v areálu ŽĎAS, a.s.. Teplárna také slouží k výrobě technologické páry. Jsou zde čtyři kotle, ale nejvíce je používán uhelný kotel K5 s vysokou účinností.

V nynější době, kdy se teplota na Zemi zvyšuje vlivem globálního oteplování a vyšší samostatnosti zákazníků, jsou teplárny méně využívány. To má za následek nižší odběry tepla a tedy snižování výroby i výnosů teplárny. Při zvyšování venkovní teploty dochází ke snižování odběrů a v případě snížení pod minimální výkon kotle K5 nastává přehřívání zpáteční větve horkovodu. Tehdy je nutné přejíždět na kotel K3 s nižším výkonem, ten má ovšem nižší účinnost a horší emisní hodnoty. K těmto problémům nejvíce dochází v přechodném období.

Diplomová práce se zabývá technickým a ekonomickým řešením přehřívání zpáteční větve horkovodu a nutností přejíždění kotlů. Nejprve je v práci pro seznámení popsána teplárna a její aktuální provoz. Následuje popis a výpočty čtyř metod, které tento problém řeší. Na závěr jsou metody srovnány a je zde popsán i experiment jedné metody.

## 1 Teplárna ŽĎAS, a.s.

### 1.1 Popis

Teplárna ŽĎAS, a.s. má celkový instalovaný tepelný výkon 84,33 MWt a elektrický výkon 6,5 MWe. Teplárna je klíčový dodavatel tepla do horkovodní sítě SATT, a.s., který teplem zásobuje velkou část města Žďár nad Sázavou. Důležitým tepelným zdrojem je také pro několik firem v areálu ŽĎAS, a.s. a dodává technologickou páru do slévárny pro vakuování oceli. Vyrobená elektřina závisí na potřebě tepla a hlavně slouží k odběru elektřiny v areálu ŽĎAS, a.s., případný přebytek elektrické energie se dodává do distribuční sítě. [1]



Obr.1 Teplárna ŽĎAS, a.s. [1]

K výrobě páry slouží 4 parní vysokotlaké kotle. Největší je kotel K5, Dukla o výkonu 43,2 MWt. Jedná se o práškový, granulační kotel se 2 stabilizačními hořáky na zemní plyn. Dále roštový kotel K3, Dukla, o výkonu 15,7 MWt a 2 plynové kotle. Kotel K7, Strojírny Kolín, o výkonu 18,3 MWt a kotel K8, Invelt, který má výkon 7,13 MWt. [1]

Výroba elektřiny je z páry kotlů K5 a K3 pomocí protitlaké turbíny TG4, R6, PBS Brno s generátorem Škoda Plzeň o jmenovitém výkonu 6 MWe (retrofit v roce 2009). Generátor je přes bloková trať vyveden do rozvodny 6/22 kV. Dále je v teplárně menší protitlaký turbogenerátor TG3 o výkonu 0,5 MWe, který je napojen na rozvodnu 6 kV. Plynové kotle K7 a K8 mají nižší parametry páry. Do výměňkové stanice dodávají páru přes redukční stanice, které nevyrábí el. energii. [1]

## 1.2 Soustava CZT

Dodávané teplo pro vytápění a přípravu TUV je realizováno pomocí horkovodů (120/70 °C) s regulací výstupní teploty horké vody v závislosti na venkovní teplotě. Kromě teplárny ŽĎAS, a.s. teplo do horkovodní soustavy CZT dodává kogenerační jednotka firmy ODAS o tepelném i elektrickém výkonu 0,6 MW spalující bioplyn. Dalším zdrojem tepla je spalínový výměník o výkonu 2,2 MWt situovaný u paty komína na kovárně. Oba doplňkové zdroje využívají odpadní teplo k ohřevu vychlazené zpětné vody horkovodu SATT, a.s.. Teplárna zásobuje dvě soustavy CZT (ŽĎAS, a.s. a SATT, a.s.), přičemž výstupy jsou oddělené a vratné větve jsou propojeny. Oddělené jsou z důvodu jiné potřeby tepla na vytápění v soustavách, v soustavě ŽĎAS, a.s. jsou nižší nároky na vytápění objektů. Rozsah horkovodní sítě SATT, a.s. je 25,5 km, horkovodní sítě ŽĎAS, a.s. je 8 km a dodávky technologické páry pro slévárnu je 0,4 km dlouhé. [1, 2]

## 1.3 Tepelné schéma teplárny

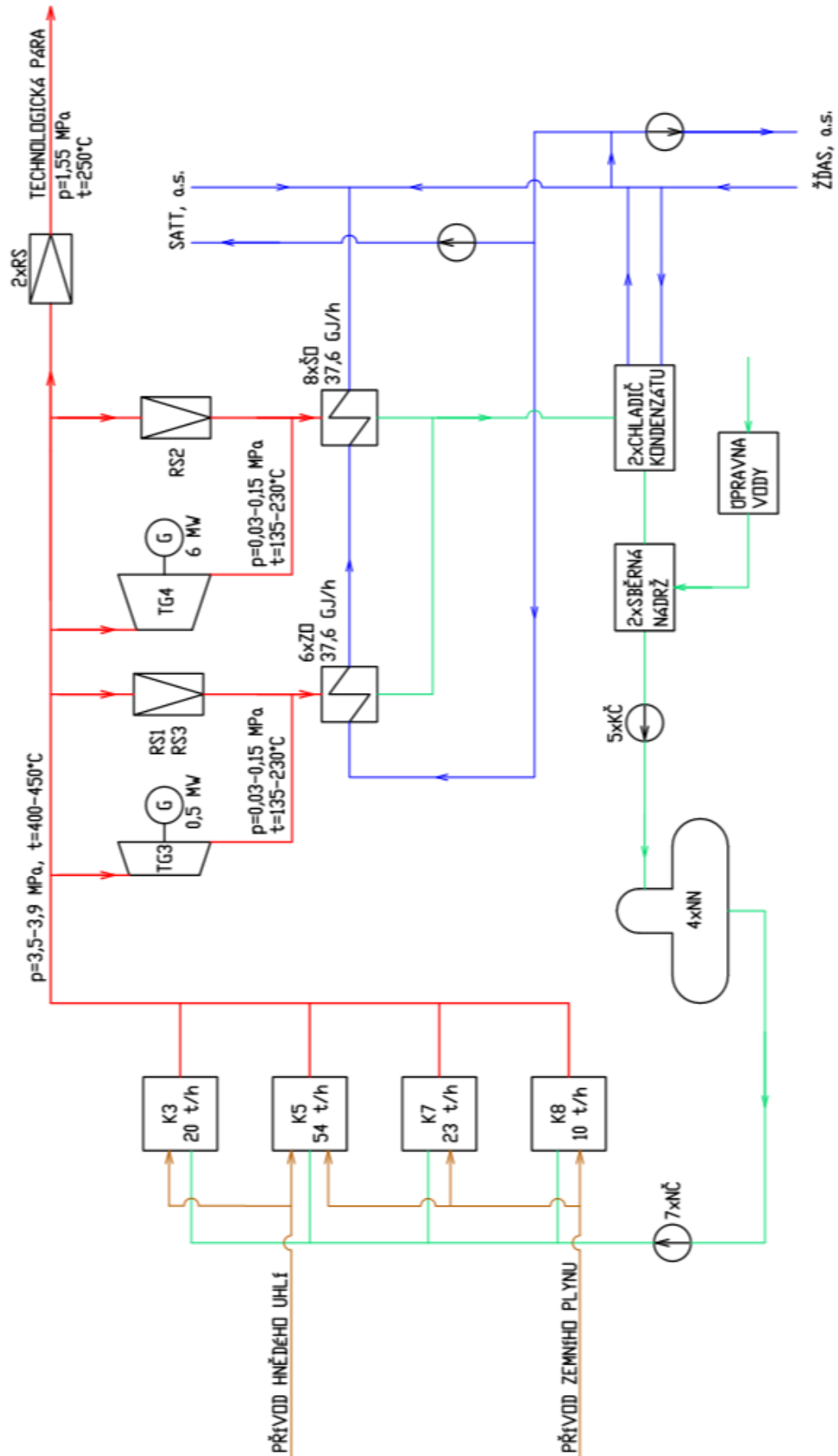
Tepelné schéma teplárny je zobrazeno na obrázku 2. Toto schéma je zjednodušené oproti reálnému tepelnému schématu, ale pro názornost je dostačující.

Jsou zde zobrazeny všechny 4 kotle s jednotlivými parními výkony. Z nich vede potrubí přehřátou páru k turbogenerátorům TG3, TG4 a k redukčním stanicím. Jsou zde zobrazeny i redukční stanice, které snižují parametry přehřáté páry pro potřebu technologické páry. Nicméně hlavní tok páry je přes turbogenerátory nebo přes redukční stanice (RS1, RS2, RS3) do výměňkové stanice, kde pára předává teplo horké vodě pro zásobování teplem. Výměňková stanice se skládá z 6 základních a 8 špičkových výměníků tepla. Každý výměník má stejný výkon a v teplárně se najíždějí postupně podle potřeby odběru tepla. Kondenzát vzniklý ve výměňkové stanici pokračuje do chladiče kondenzátu, sběrných nádrží a pomocí kondenzátních čerpadel proudí do napájecích nádrží. Voda z napájecích nádrží je čerpána napájecími čerpadly zpět do kotlů.

Dále je ve schématu zobrazeno palivo, které je použito u jednotlivých kotlů. Hnědé uhlí je zavedeno do kotlů K3 a K5. Zemní plyn slouží ke spalování v kotlích K7 a K8 a ke stabilizaci v kotli K5.

Je zde ještě zobrazena úprava vody jako jediný blok, který je složitější a bude popsán dále. Přídavná voda je zavedena do sběrných nádrží.

Další okruh, zobrazený tmavě modrou barvou, je horkovodní. Ten zásobuje teplem město a areál ŽĎAS, a.s. a je vyveden z teplárny. Zpětná větev ŽĎAS, a.s. je smíchána s městskou horkovodní sítí SATT, a.s. a zavedena do výměňkové stanice. Zde voda přijme teplo, je vyvedena a rozdělena do obou horkovodních sítí. Na odcházejících větvích horkovodů z teplárny jsou umístěna čerpadla.



Obr.2 Tepelné schéma teplárny ŽĎAS, a.s. [1]

#### 1.4 Kotel K5

Jedná se o kotel firmy ČKD Dukla vyrobený v roce 1982. Tento kotel je práškový s granulačním ohništěm a mlýnicovým topením. Stabilní jednobubnový kotel s přirozenou cirkulací, zavěšený na nosné konstrukci. Kotel je dvoutahový se sálavou spalovací komorou, která je tvořena membránovými stěnami, stejně tak i část druhého tahu. Na přední stěně jsou umístěny čtyři práškové vířivé hořáky. Na obou bočních stěnách je instalováno po jednom plynovém hořáku o výkonu 6 MW. [1]

Spalovací komora je nad hořáky zúžena, což napomáhá větší stabilizaci plamene a dokonalému vyhoření paliva. Spodní díl komory přechází klínovitě do odstruskovacího otvoru. Izolace jsou provedeny skelnou vatou, sibralem a oplechováním. Zazdívka je kolem krabic práškových a plynových hořáků. [1]

Tab. 1 Parametry kotle K5 [1]

Jmenovitý tepelný výkon	43,2 MW
Tepelný příkon	49,1 MW
Jmenovitý parní výkon	54 t/h
Jmenovitý tlak přehřáté páry	3,73 MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	445 °C
Teplota napájecí vody	105 °C
Účinnost při jmenovitém výkonu	85,6 % *
Účinnost při minimálním výkonu	90,33 % *
Průměrná účinnost kotle	88 %
Největší množství vyrobené páry	65 t/h
Minimální parní výkon bez stabilizace	18 t/h

\* Účinnost byla měřena nepřímou metodou při garančním měření kotle K5 v březnu 2006 dle ČSN 070302 při čistých teplosměnných plochách s garantovaným palivem za ustáleného stavu, přepočteno na teplotu okolí +20 °C.

Výparník je čistě sálavý, jednotahový s přirozenou cirkulací a membránovými stěnami. Přehřívák páry je dvoustupňový, sálavá část je umístěna v horní části spalovací komory a konvenční část je umístěna na začátku druhého tahu. Regulace teploty páry se provádí vstřikem kondenzátu. Ohřívák vody je dvoudílný s konvenčním přestupem tepla. Napájecí voda je přivedena ke dvěma napájecím hlavám a odtud do kondenzátoru, z něhož prochází přes dva bloky ohříváku do parního bubnu. Kondenzátor je ještě propojen jedním potrubím a uzavíracím ventilem s prostorem bubnu. Ventil je zabudován z důvodu udržení minimální teploty spalin na vstupu do elektrodlučovače. Ohřívák vzduchu je trubkový, na straně spalin jednotahový (spaliny uvnitř trubek) a na straně vzduchu dvoutahový. [1]

Tab. 2 Parametry elektrodlučovače [1]

Výrobce	ZVVZ Milevsko
Typ	RKG 1-16-7,5-6-3-250-3,5-1
Počet sekcí za sebou	3
Počet odlučovacích komor	16
Jmenovitá výška odlučovače	7,5 m
Vstupní průtočný průřez	38,96 m <sup>2</sup>
Aktivní usazovací plocha	2838,72 m <sup>2</sup>

Počet výsypek na jednu sekci	1
Uzávěry výsypek	rotační podavač
Způsob odvodu popílku	mechanický
Počet usazovacích elektrod v sekci	6
Elektrody 1. sekce	typ ISODYN
Elektrody 2. sekce	typ ASTEROID
Oklepávání elektrod	trvalé, v programu
Garantovaná účinnost odlučovače	99 %

Kotel musí obsahovat veškeré zákonné přístroje nutné pro provoz kotle: uzavírací, odkalovací, odluhovací a pojišťovací ventily, vodoznaky, manometry, teploměry. Jsou zde také části k uchycení komor a potrubí, expanzní klapky, kukátka, vstupní průlezy do kotle, krabice práškových a plynových hořáků a dýz terciálního vzduchu, držení hořáků a radiačních pyrometrů. [1]

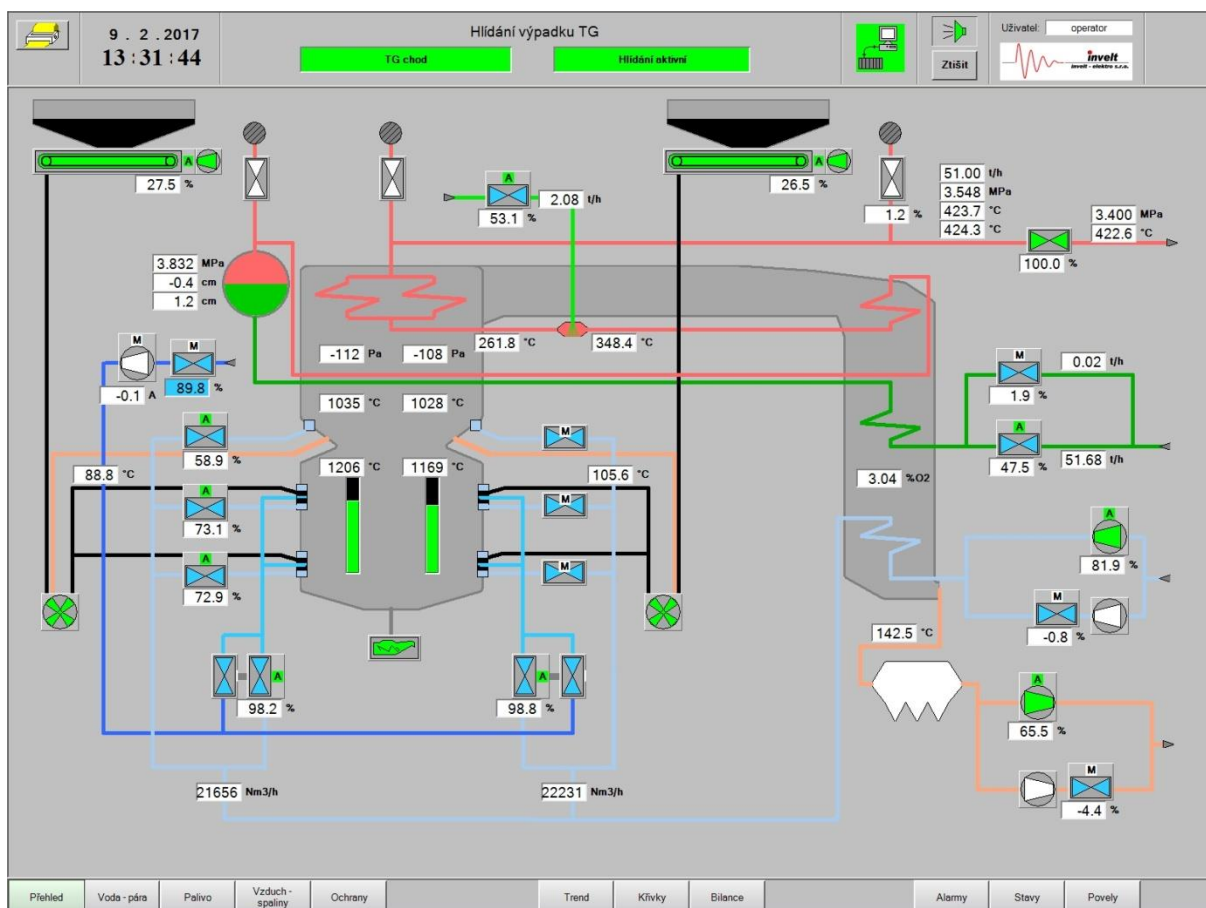
Kotel má dva tlukadlové mlýny, přičemž každý ústí do dvou vířivých hořáků umístěných na přední stěně. Směs prášku a spalín je z mlýnu vytlačována kruhovým potrubím do hořáku opatřeného spirálovou skříní sekundárního spalovacího vzduchu a potrubím jádrového vzduchu. Tlukadlové mlýny TB 18 SL6 mají krajní ramena osazena deskami pro ochranu ramen a podporu ventilace. Pancéřování mlýnů je z ocelových plechů Hardox, nouzová výsypka je v čele mlýnu. Rotor je uložen ve dvou valivých ložiskách s olejovou lázní, je chlazen vodou a skládá se ze sedmi klapek (1. klapka je napevno uzavřena, 2. - 4. klapka je spojená táhlem a ovládaná společnou pákou a 5. - 7. klapka je spojená táhlem a ovládaná společnou pákou). [1]

Dále má kotel dva vzduchové ventilátory. Hlavní, frekvenčně řízený vzduchový ventilátor ARD 4-1000-90°, který má silnější motor. Záložní ventilátor, používaný v případě poruchy hlavního ventilátoru, ARD 1-1000-90°, řízený věncem se slabším motorem, který není schopný dodávat vzduch pro maximální výkon kotle K5. Horký vzduch se k hořákům dopravuje potrubím umístěným na obou stranách kotle z ohříváku vzduchu. Před hořáky se obě potrubí spojí a horký vzduch je přepouštěn do 4 vířivých hořáku (jádrový a sekundární spalovací vzduch) a 12 dýz terciálního vzduchu (terciální spalovací vzduch). [1]

Nasávací šachty nasávají spaliny ze spalovací komory do mlýnů. Do nasávací šachty se svodkou ze zásobníku paliva, o objemu 125 m<sup>3</sup>, přes podavače paliva přivádí uhlí do proudu spalín a směs rozemletého paliva se odvádí přes třídič mlýnu k hořákům. Pod kotlem je řetězový vynašeč škváry, který přepravuje škváru na gumový dopravník pod ním. [1]

Řídicí systém PLC SIEMENS SIMATIC S7-300 realizuje měření všech analogových technologických veličin, snímání a vyhodnocování stavů logických snímačů, ovládání a signalizaci pohonů, potřebné regulační okruhy daného technologického celku a ochrany kotle. Systém zobrazuje aktuální a poruchové stavy, umožňuje archivaci všech požadovaných dat po dobu minimálně jednoho měsíce. Celá technologie je rozdělena do několika snímků, které obsahují všechna technologická data, poruchová hlášení a grafy vybraných veličin. Technologické snímky se skládají ze sedmi záložek a to přehled, voda-pára, vzduch-spaliny, palivo, alarmy, události a trendy. [1]





Obr. 3 Řídicí systém - přehled [1]

Kotel je vybaven dvěma najížděcími a stabilizačními hořáky WEISHAUPT G60/2-A na zemní plyn o výkonu každého hořáku 6 MW. Před hořákem je regulační a zabezpečovací řada a plynový přírubový filtr. Hořáky obsahují potřebné hořákové armatury, hlídače plamene, filtry, regulátory tlaku, řídicí skříně a plynoměr, který je umístěn před regulačním ventilem. Součástí hořáku je i vzduchový ventilátor. [1]

Napájení kotle probíhá nepřetržitě z důvodu chlazení ohříváku vody. Probíhá automaticky, závisí na množství vody, páry a stavu hladiny v bubnu. Jsou zde dvě napájecí větve, ale v provozu je vždy pouze jedna větev, druhá je záložní. Odluhování se provádí po celou dobu provozu kotle nepřetržitě pomocí odluhovacího a uzavíracího ventilu na bubnu tak, aby podle ČSN 077401 byla vodivost kotelní vody max. 2700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Odkalování naopak probíhá jednou, krátce za směnu. [1]

## 1.5 Kotel K3

Roštový, dvoububnový, strmotrubný, sálavý dvoutahový parní kotel vyroben firmou ČKD Dukla v roce 1957. Kotel má trubkový ohřívák vody, trubkový přehřívák páry, přesuvný rošt „Šperl“ o ploše 52 m<sup>2</sup> poháněný dvěma ventilátory (motor ventilátoru má výkon 4 kW a otáčky 1440 min<sup>-1</sup>) a 2 mechanické odlučovače KORSA napojené na el. odlučovač kotle K5. V roce 2006 byl snížen výkon kotle z 40 t/h na 20 t/h, palivo je hnědé uhlí. U tohoto kotle je z emisních důvodů omezený počet pracovních hodin v roce. [1]

Tab. 3 Parametry kotle K3 [1]

Jmenovitý tepelný výkon	15,7 MW
Tepelný příkon	22,4 MW
Jmenovitý parní výkon	20 t/h
Jmenovitý tlak přehřáté páry	3,8 MPa
Maximální tlak přehřáté páry	3,9 MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	425 °C
Maximální teplota přehřáté páry	460 °C
Teplota napájecí vody	105 °C
Účinnost kotle	70 %

## 1.6 Kotel K7

Parní kotel na zemní plyn od firmy Strojírny Kolín, r. v. 1995. Je vysokotlaký, dvoububnový, vodotrubný s jedním plynovým hořákem RAY GmbH, typ hoříku EG - 2000 o maximálním výkonu 23,25 MW. Spalovací komora i konvekční tah jsou vodorovné a jejich trubky jsou zaústěny do dvou bubnů, obvodové stěny jsou membránové. Přehřívák je vodorovný a skládá se ze dvou bloků. Ohřívák je tvořen třemi částmi upevněnými na nosné konstrukci. [1]

Tab. 4 Parametry kotle K7 [1]

Jmenovitý tepelný výkon	18,3 MW
Tepelný příkon	19,9 MW
Jmenovitý parní výkon (garantovaný)	23 t/h
Výstupní tlak páry (garantovaný)	3,8 MPa abs
Výstupní teplota páry (garantovaná)	440 °C
Teplota napájecí vody	105 °C
Účinnost (při teplotě okolního vzduchu 20 °C)	94 %

## 1.7 Kotel K8

Plynový kotel K8 od firmy Invelt servis s.r.o., r.v. 2013, je horizontální, přetlakový na straně spalín, jednobubnový, vodotrubný s přirozenou cirkulací. Ohřívák vody je konvekční a je v zadních tazích kotle. Výparník vytváří spalovací komoru, druhý a třetí tah kotle. V druhém tahu je umístěný dvoudílný konvekční přehřívák. Kotel má 2 stejné monoblokové hořáky typu Weishaupt WM-630/3-A, provedení ZM-LN o výkonech 3,85 MW se spotřebou paliva při nominálním výkonu 812 Nm<sup>3</sup>/h. Kotel se používá k výrobě technologické páry (1,4 MPa, 200 °C) a vytápění v přechodném období. [1]

Tab. 5 Parametry kotle K8 [1]

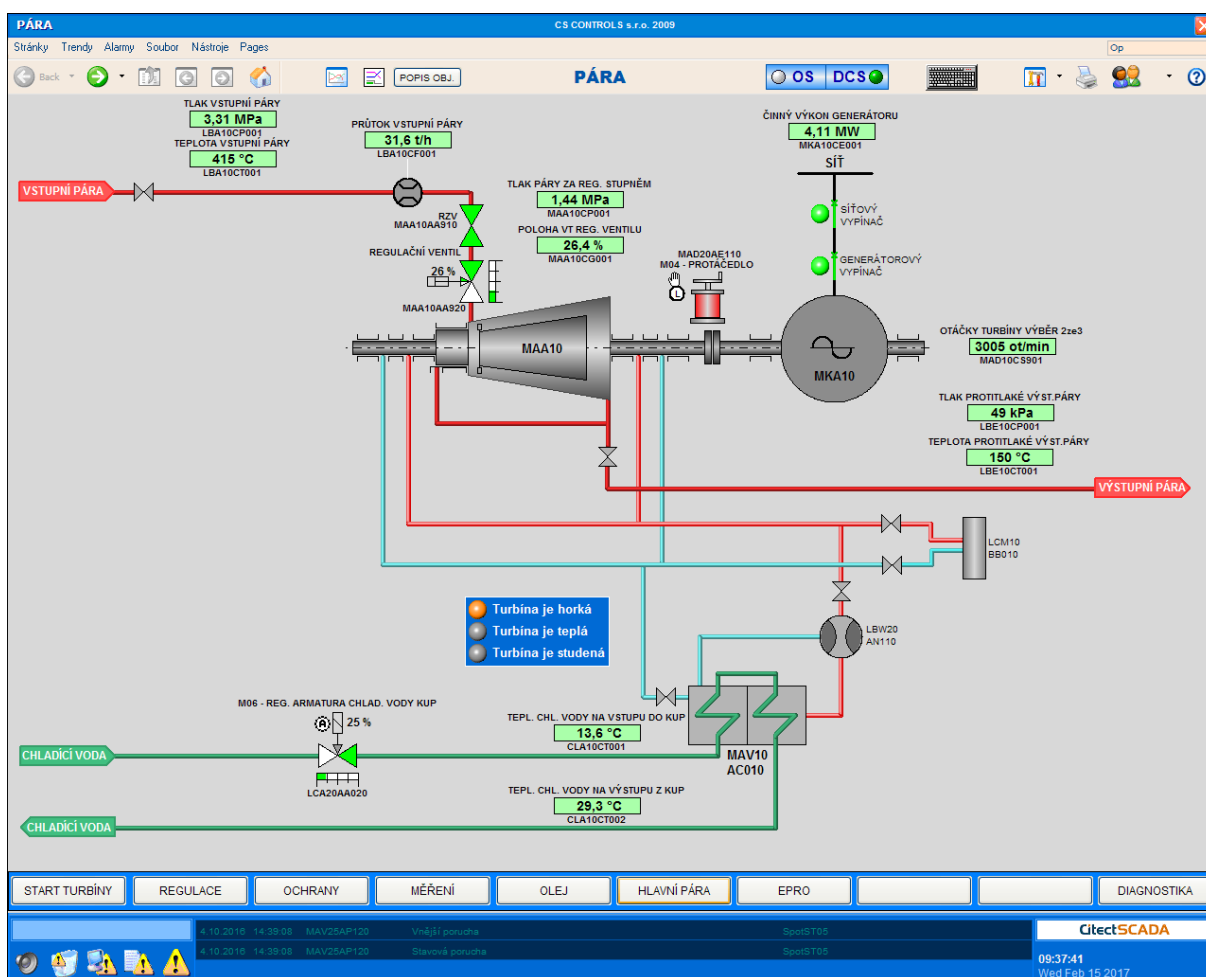
Jmenovitý tepelný výkon	7,13 MW
Tepelný příkon	7,67 MW
Jmenovitý parní výkon (garantovaný)	10 t/h
Výstupní tlak páry (garantovaný)	2,5 MPa abs
Výstupní teplota páry (garantovaná)	300 °C
Teplota napájecí vody	105 °C
Účinnost (při teplotě okolního vzduchu 20 °C)	93 %

## 1.8 Turbogenerátor TG4

Hlavní částí turbogenerátoru je protitlaká turbína od firmy PBS Brno o výkonu 6 MW a alternátor ŠKODA Plzeň a.s.

Jednotělesová přetlaková turbína s regulačním stupněm, kde je možné měnit výkon v rozmezí 0,4 - 6 MW. Turbína byla určena pro provoz MEZ Mohelnice, kde sloužila do konce roku 2001. V teplárně ŽĐAS, a.s. byla nainstalována po přepočtu na nižší protitlak (0,12-0,5 MPa) v roce 2009. Turbinová skříň je ze speciální oceli a celokovaný rotor je uložen v radiálních ložiskách s tlakovým mazáním. Osová síla je zachycena obousměrným axiálním ložiskem. Ucpávky jsou labyrintové s použitím ucpávkové páry, kde je přetlaková a podtlaková větev ucpávkové páry a tato pára je vedena do kondenzátoru ucpávkové páry. Spojka mezi turbínou a generátorem je pevná. Olejové hospodářství je společné pro turbínu i alternátor. Jsou zde dvě hlavní olejová čerpadla (HOČ) s automatickým spuštěním, která jsou uložena na víku olejové nádrže o objemu 2,5 m<sup>3</sup>. Dále je zde nouzové čerpadlo a dva chladiče oleje. Rychlouzávěrný difuzorový ventil je připojen horizontálně v horní polovině turbinové skříně a jeho pohon je hydraulický. Regulační ventily jsou také difuzorové, ale ovládány jsou servomotorem. [1]

Tento turbogenerátor je provozován výhradně v topném období pro potřebné parametry páry, které v letních měsících nejsou dosahovány. Probíhá zde vysokoúčinná produkce Kvet. [1]



Obr. 4 Okno PÁRA na TG4 v systému teplárny [1]

Tab. 6 Parametry turbogenerátoru TG4 [1]

Označení turbíny	R6 - 3,5/0,4
Výkon při $\cos\phi=0,8$	6 MW
Otáčky	3000 min <sup>-1</sup>
Tlak na vstupu	3,5 MPa
Teplota na vstupu	435 °C
Protitlak	0,4 MPa
Nový protitlak	0,12-0,5 MPa
Průtok páry	50 t/h

### 1.9 Turbogenerátor TG3

Turbogenerátor TG3 se skládá z jednostupňové protitlaké parní turbíny s převodovkou a asynchronním motorem. Vývod elektrické energie je do sítě 6 kV. Tato turbína se používá pouze pro kotle spalující uhlí, tj. kotel K5 a K3. Plynové kotle nedodávají páru do tohoto turbogenerátoru z ekonomického důvodu. [1]

Tab. 7 Parametry turbogenerátoru TG3 [1]

Označení turbíny	MZ 550
Výkon	500 kW
Otáčky	3000 min <sup>-1</sup>
Tlak na vstupu	3,0 MPa
Teplota na vstupu	435 °C
Protitlak	0,15-0,5 MPa
Průtok páry	10 t/h

### 1.10 Turbogenerátor TG1

Tento turbogenerátor byl vyřazen a je nahrazen výše zmíněným turbogenerátorem TG4. Parametry obou turbosoustrojí jsou téměř stejné. Turbogenerátor se však stále nachází ve strojovně teplárny a je možné využít kondenzátor k případné kondenzaci páry. Jednotělesová, protitlaká turbína s neregulovaným odběrem páry byla upravena z kondenzační turbíny vyřazením posledních 5 pracovních stupňů. [1]

Tab. 8 Parametry turbogenerátoru TG1 [1]

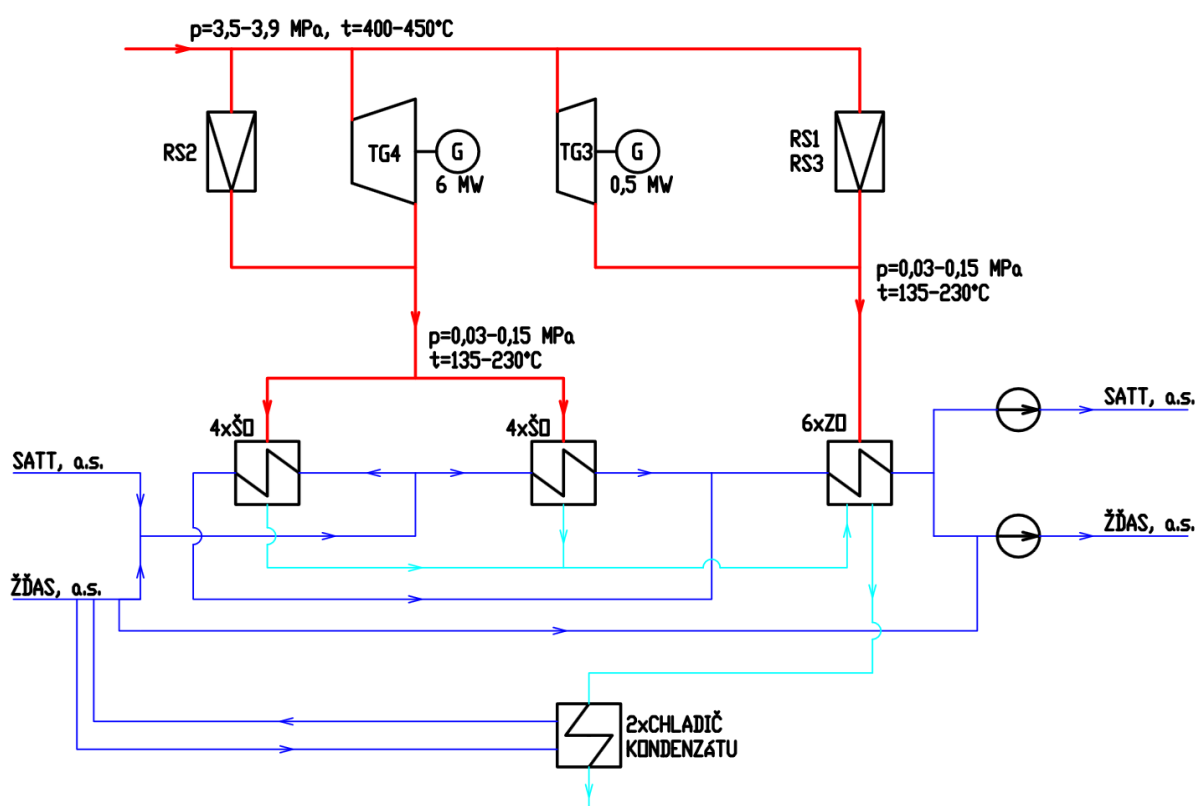
Výkon	6 MW
Otáčky	3000 min <sup>-1</sup>
Tlak na vstupu	3,6 MPa
Teplota na vstupu	435 °C
Protitlak	0,1 MPa
Průtok páry	52 t/h

Povrchový kondenzátor má chladicí plochu 500 m<sup>2</sup> a je připojen k výstupnímu hrdlu turbíny. Je dělený na 3 vodní cesty. Množství chladicí vody je 1400 m<sup>3</sup>/h a tato voda prostupuje dvěma samostatnými proudy. Nezkondenzovaná parovzdušná směs je odsávána paroproudou dvoustupňovou vývěvou. Jsou zde dvě kondenzační čerpadla, každé pro 32 m<sup>3</sup>/h. [1]

### 1.11 Výměníková stanice

Výměníková stanice se skládá ze 14 výměníků o výkonu 37,6 GJ/h. Výměníky jsou rozděleny na 8 špičkových a 6 základních. V teplárně se do provozu zapojují postupně se zvyšujícím odběrem tepla. Nejprve se zapojí špičkové a s velkými odběry tepla se zapojí i základní. Pára tedy proudí z turbogenerátoru TG4 nebo z redukční stanice RS2 do špičkových výměníků, kde předá teplo horké vodě a zkondenzuje. Pára také může být vedena přes TG3, RS1 nebo RS3 přímo do základních ohříváků. Poté je kondenzát veden přes základní ohříváky do chladiče kondenzátu a pokračuje dále v oběhu. Každý výměník má obtok, aby bylo možné snižovat předané tepelné výkony v závislosti na odběru a případně i pro kontrolu a údržbu výměníků. [1]

Horká voda ze sítí SATT, a.s. a ŽĎAS, a.s. se promíchá a je vedena do špičkových výměníků. Dále proudí přes základní ohříváky a na výstupu z teplárny se horkovod rozdělí zpět do dvou sítí, SATT, a.s. a ŽĎAS, a.s..



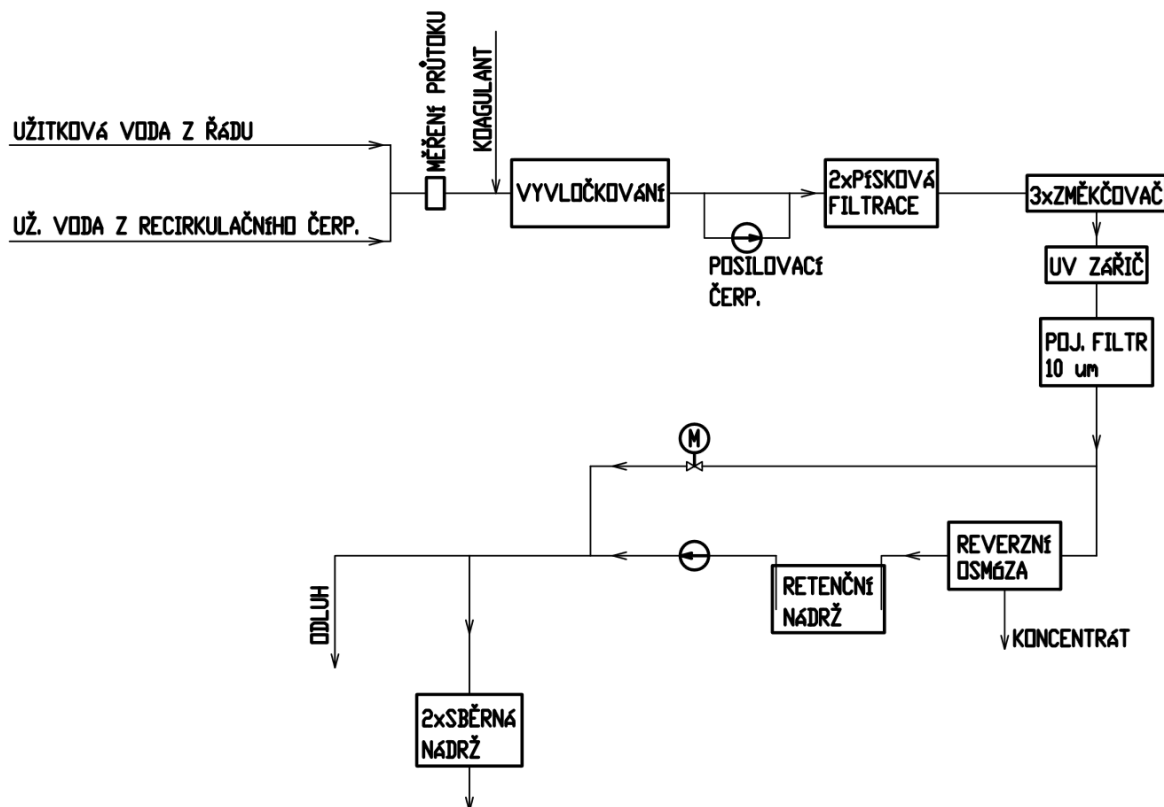
Obr.5 Schéma výměníkové stanice

### 1.12 Redukční stanice

Redukční stanice v teplárně slouží ke snižování parametrů přehřáté páry. Dvě redukční stanice jsou umístěny na potrubí technologické páry, kde upravuje parametry páry na požadovanou hodnotu. Dále jsou redukční stanice umístěny paralelně s turbogenerátory TG4 a TG3 tak, aby mohly snížit parametry páry na vstup do výměníkové stanice. V teplárně jsou také točivé redukce, které se používají k pohonu napájecích čerpadel. [1]

### 1.13 Úpravna vody

V teplárně je úpravna vody o kapacitě 30 m<sup>3</sup>/h, ve které se upravuje užitková voda na vodu kotelní a doplňkovou. Úprava vody se provádí filtrací, změkčením, osmotickou demineralizací, termickým odplyněním a dávkováním chemikálií. Jako rezervní zásobník vody se používá bazén chladicí věže o objemu 1200 m<sup>3</sup>. [1]



Obr. 6 Schéma úpravy vody [1]

### 1.14 Palivo

Jako základní palivo je používáno nízkosirné severočeské hnědé uhlí bez přísady aditiv. Toto palivo se používá u kotlů K5 a K3. V areálu ŽĐAS, a.s. je otevřená skládka paliva o objemu 20000 t. Dodávka uhlí je formou ucelených vlaků. Zemní plyn je spalován v kotli K5 jako najížděcí a stabilizační palivo a v kotlích K7 a K8 jako jediné palivo. Zemní plyn se bere z páteřního plynovodu při provozním přetlaku 100 kPa. Odběrové potrubí je DN 500, ze kterého se odebírá plyn do teplárny. Na teplárně je potrubí rozvodné DN 400, přívod ke kotlům je DN 200 a DN 150. Dále výrobce kotlů uvádí jako palivo agropelety, ale ty se zde používají pouze jako experimentální palivo. [1]

Tab. 9 Hodnoty výhřevností paliv [1]

Hnědé uhlí	15 MJ/kg
Zemní plyn	34,7 MJ/m <sup>3</sup>

## 2 Stávající stav

### 2.1 Popis

Během přechodného období dochází k přehřívání zpáteční větve horkovodu. Do teplárny ústí dvě sítě a to SATT, a.s. dodávající horkou vodu do města Žďár nad Sázavou a síť dodávající horkou vodu v areálu ŽďAS, a.s.. Síť horkovodu ŽďAS, a.s. je rozdělena do tří horkovodů, které se smíchají před vstupem do teplárny a na výstupu z teplárny je horkovod rozdělen zpět na tři.

Zpětná větev ze sítě SATT, a.s. je vychlazená dostatečně, protože odběry tepla ve městě Žďár nad Sázavou jsou poměrně konstantní. Horká voda z horkovodu se předává na objektových předávacích stanicích, kterých je 285, kde se upravují parametry dodávané horké vody pro vytápění i pro ohřev teplé vody. Regulace teploty výstupní horké vody probíhá v závislosti na venkovní teplotě podle teplotního diagramu. Do města vede horkovod o vydatném průtoku a případný menší odběr tepla některého zákazníka v tomto množství je téměř zanedbatelný.

Přehřívání zpětná větev horkovodu je tedy v areálu ŽďAS, a.s., kde se horká voda používá především k vytápění několika firem. Tyto firmy využívají dodávané teplo hlavně na vytápění výrobních hal. V přechodném období, na jaře a na podzim, je poměrně velký rozdíl v teplotách v noci a ve dne. Téměř všechny tyto haly mají velká střešní okna či několik světlíků a za teplého počasí se haly poměrně rychle vytopí jenom díky svitu Slunce. V tomto případě se spotřeba tepla razantně mění během dne, kdy ráno je tepla potřeba nejvíce, ale během dne spotřeba tepla rychle klesá a k večeru spotřeba zase stoupá a dochází k problematickému přehřívání zpětné větve horkovodu.

Zde jsou dvě hlavní možnosti výroby tepla a to v kotli K5 nebo v kotli K3. Kotel K5 je limitní minimálním výkonem, který je v případě sníženého odběru tepla stále velký a tím pádem dochází k přehřívání zpáteční větve horkovodu. Druhá možnost je využití kotle K3, který má jmenovitý výkon nižší a je možné ho provozovat i pro nižší odběry tepla. U tohoto kotle je ovšem problém nižší účinnost, která má za následek vyšší náklady na vyrobené teplo a také horší emisní limity.

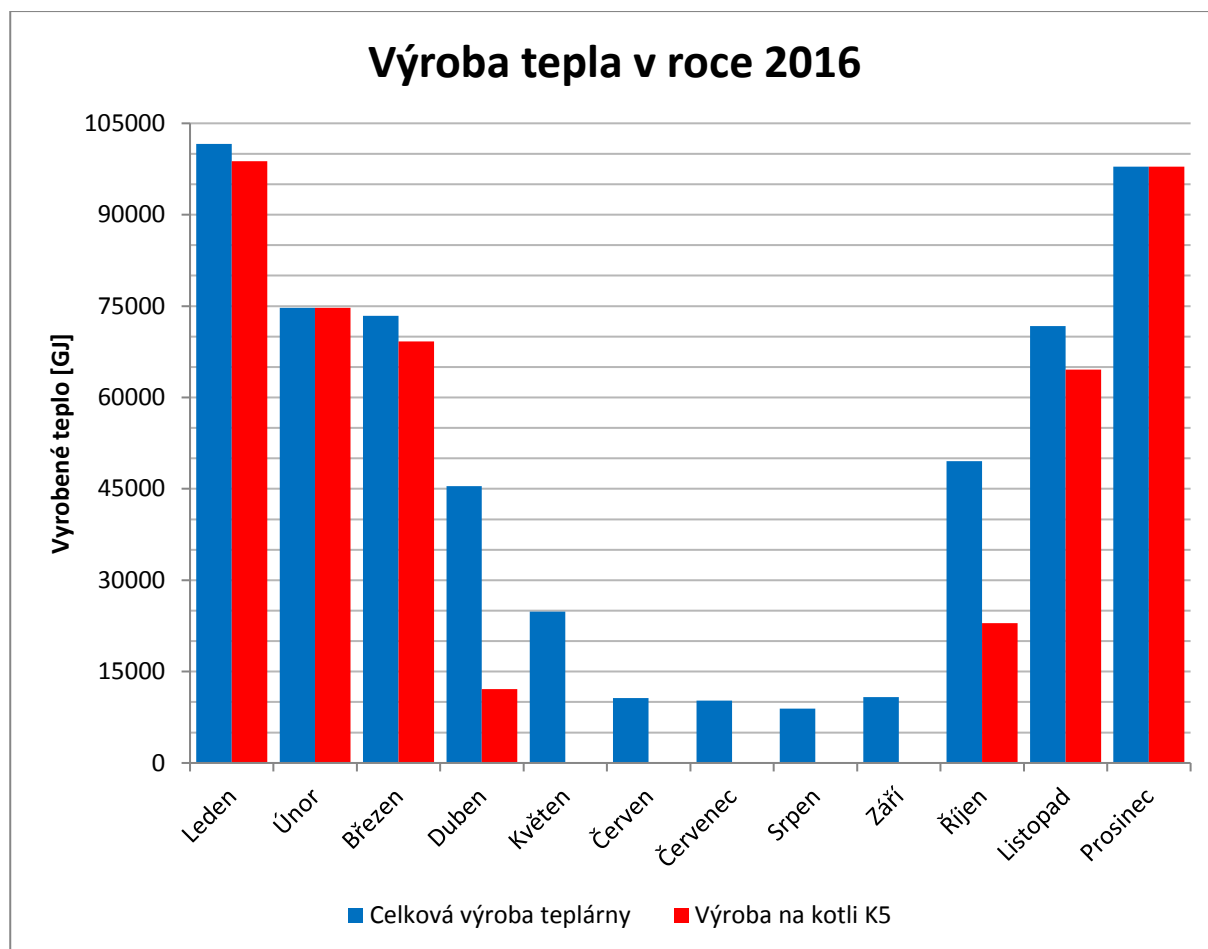
### 2.2 Roční využití kotle K5

V teplárně je požadavek na častější využívání kotle K5, který má vysokou účinnost a dobré dosahované parametry provozu. Práce kotle je závislá na odběru tepla, který je mimo zimní období nižší. Tím pádem je potřeba nižší výkon než minimální výkon kotle K5 a je nutnost přejít na jiný kotel. Je zde možnost přejít na plynové kotle K7 a K8 a na uhelný kotel K3.

Kotel K3 je v provozu v letním období, kdy není taková spotřeba tepla, protože spalování hnědého uhlí je úspornější než spalování zemního plynu. Také je používán s točivou redukcí TG3, ale zde není dosahováno vysokoúčinné výroby KVET. Tento kotel má však nižší účinnost a omezený počet provozních hodin.

Kotel K5 je provozován v zimním období, kde se využije jeho celý výkon a s protitlakým TG4 dosahuje vysokoúčinné výroby KVET. V případě větší potřeby tepla se používá další kotel a to jeden z plynových kotlů K7 a K8.

V přechodném období nastává problém, na jaře a na podzim, kdy je nižší odběr tepla v odpoledních hodinách a dochází k přehřívání vratného horkovodu, tudíž je třeba nižší výkon kotle. Kotel K5 je možné provozovat do minimálního výkonu a pokud rozdíl potřebného tepla a minimálního výkonu kotle K5 přesáhne únosnou mez je nutné přejít na kotel K3.



Obr. 7 Roční využití kotle K5 [1]

V tomto grafu (obr. 7) je patrné, že kotel K5 je využíván od listopadu do března na vysoký výkon a v létě je kotel odstaven. Větší problémy s provozem nastávají v dubnu a v říjnu, kdy už je zapotřebí více tepla, ale není ho dostatek na stálý provoz kotle K5. Tyto data jsou podložena i Českým hydrometeorologickým ústavem. V tabulce 10 jsou průměrné teploty na Vysočině. Je zde vidět, že potřeba tepla odpovídá grafu na obr. 7. Od března do května se průměrné teploty nejvíce zvýší, naopak největší pokles teploty je od září do listopadu.

Tab. 10 Průměrná teplota na Vysočině v roce 2016 [3]

Měsíc											
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.
-1,9	2,8	2,9	7,4	13	16,9	18,4	16,8	15,8	6,9	2,1	-1,2

### 2.3 Výpočet tepla a výnosů

Pro výpočet jsou brány hodnoty při minimálním výkonu kotle K5. V tabulce 11 jsou zadány hodnoty potřebné k výpočtu. Je zde minimální parní výkon kotle K5, parametry přehřáté páry a páry v protitlaku, účinnost kotle při minimálním výkonu, teplota napájecí vody, účinnost turbogenerátoru TG4, náklady na výrobu z hnědého uhlí a výnosy z vyrobeného tepla a elektřiny a vlastní spotřeba elektrické energie teplárny pro výrobu elektřiny a tepla.



Tab. 11 Zadané hodnoty pro výpočet stávajícího stavu [1]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Minimální parní výkon K5	$m_p$	18	t/h
Teplota přehřáté páry K5	$t_{ppK5}$	395	°C
Tlak přehřáté páry K5	$p_{ppK5}$	3,5	MPa
Teplota páry v protitlaku	$t_R$	150	°C
Tlak páry v protitlaku	$p_R$	0,15	MPa
Účinnost kotle K5 při $P_{min}$	$\eta_{K5}$	90	%
Teplota napájecí vody	$t_{NV}$	108	°C
Účinnost TG4	$\eta_{TG4}$	55	%
Náklady na hnědé uhlí	$N_{HU}$	84	Kč/GJ
Výnosy z vyrobeného tepla	$V_Q$	213	Kč/GJ
Výnosy z vyrobené elektřiny	$V_{el}$	1,8	Kč/kWh
Spotřeba teplárny 03/2017	$S$	579452	kWh

Účinnost turbogenerátoru TG4 byla vypočtena. Do účinnosti se promítá více faktorů. Otáčky turbíny jsou  $3000 \text{ min}^{-1}$ , čili turbína je pomaloběžná, turbína má krátké lopatky za regulačním stupněm a z toho plynou vyšší ztráty. Další vliv na účinnost má bandážování lopatek, v této turbíně nejsou lopatky bandážované. U turbíny také mohlo dojít k zasolení lopatkových kanálů, protože je v provozu poměrně dlouhou dobu.

Vlastní spotřeba elektrické energie v teplárně je brána z března roku 2017. Tento měsíc je velice teplý a odpovídá přechodnému období, kdy se snižují odběry, tedy je zapotřebí snížit teplotu horkovodu.

V tabulce 12 jsou zaznamenány hodnoty entalpií potřebných k výpočtu. Tyto veličiny jsou určeny ze zadaných hodnot v tabulce 11. Entalpie napájecí vody je funkcí teploty napájecí vody, entalpie přehřáté páry je funkcí teploty a tlaku přehřáté páry a entalpie v protitlaku je funkcí teploty a tlaku páry v protitlaku.

Tab. 12 Entalpie potřebné k výpočtu

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Entalpie napájecí vody	$i_{NV}$	452,9	kJ/kg
Entalpie přehřáté páry K5	$i_{ppK5}$	3211,4	kJ/kg
Entalpie v protitlaku	$i_R$	2772,9	kJ/kg

Minimální vyrobené teplo na kotli K5

$$Q_{K5} = \frac{m_p \cdot (i_{ppK5} - i_{NV})}{1000} = \frac{18 \cdot (3211,4 - 452,9)}{1000}$$

$$Q_{K5} = 49,65 \text{ GJ/h}$$

Teplo dodané v palivu pro výrobu minimálního výkonu kotle K5 při účinnosti 90 %

$$Q_{dK5} = Q_{K5} \cdot \frac{100}{\eta_{K5}} = 49,65 \cdot \frac{100}{90}$$

$$Q_{dK5} = 55,17 \text{ GJ/h}$$

Náklady na vyrobené teplo z hnědého uhlí při minimálním výkonu kotle K5

$$N_{QK5} = Q_{dK5} \cdot N_{HU} = 55,17 \cdot 84$$

$$N_{QK5} = 4634,3 \text{ Kč/h}$$

Cena prodaného tepla z hnědého uhlí při minimálním výkonu kotle K5

$$C_{QK5} = Q_{K5} \cdot V_Q = 49,65 \cdot 213$$

$$C_{QK5} = 10576,1 \text{ Kč/h}$$

Výnosy z vyrobeného tepla z hnědého uhlí při minimálním výkonu kotle K5

$$V_{QK5} = C_{QK5} - N_{QK5} = 10576,1 - 4634,3$$

$$V_{QK5} = 5941,8 \text{ Kč/h}$$

Vyrobena elektřina při minimálním výkonu kotle K5

$$P_{elK5} = \frac{m_p}{3,6} \cdot (i_{ppK5} - i_R) \cdot \frac{\eta_{TG4}}{100} = \frac{18}{3,6} \cdot (3211,4 - 2772,9) \cdot \frac{55}{100}$$

$$P_{elK5} = 1205,9 \text{ kW}$$

Výnosy z vyrobené elektřiny při minimálním výkonu kotle K5

$$V_{elK5} = P_{elK5} \cdot V_{el} = 1205,9 \cdot 1,8$$

$$V_{elK5} = 2170,6 \text{ Kč/h}$$

Průměrné náklady na vlastní spotřebu elektrické energie teplárny v březnu 2017

$$N_{tep} = \frac{S \cdot V_{el}}{24 \cdot 31} = \frac{579452 \cdot 1,8}{24 \cdot 31}$$

$$N_{tep} = 1401,9 \text{ Kč/h}$$

Zde se jedná o průměrné náklady, které stojí hodina provozu teplárny na výrobu tepla a elektřiny při minimálním parním výkonu kotle K5. Je zde počítáno se spotřebou teplárny v měsíci březnu, který byl velice teplý, čili odpovídá přechodnému období. Ve jmenovateli je počet hodin vynásobený počtem dnů v daném měsíci, v čitateli je spotřeba elektrické energie za měsíc a cena elektrické energie, za kterou by se tato elektřina prodala. Teplárna vyrobí elektřinu, která slouží k vlastní spotřebě teplárny, dále se rozvádí po areálu ŽĐAS, a.s. Jako poslední možnost je prodat ji do sítě E.ON.

Celkové výnosy z výroby na kotli K5 při minimálním výkonu

$$V_{cK5} = V_{QK5} + V_{elK5} - N_{tep} = 5941,8 + 2170,6 - 1401,9$$

$$V_{cK5} = 6710,5 \text{ Kč/h}$$

Tab. 13 Výsledky výpočtů výroby na kotli K5 při minimálním parním výkonu 18 t/h

$Q_{K5}$ [GJ/h]	49,65
$Q_{dK5}$ [GJ/h]	55,17
$N_{QK5}$ [Kč/h]	4634,3
$C_{QK5}$ [Kč/h]	10576,1
$V_{QK5}$ [Kč/h]	5941,8
$P_{elK5}$ [kW]	1205,9
$V_{elK5}$ [Kč/h]	2170,6
$N_{tep}$ [Kč/h]	1401,9
$V_{cK5}$ [Kč/h]	6710,5

Výsledky výpočtů při výrobě kotle K5 na minimální výkon jsou zaznamenány v tabulce 13. Je zde vyrobené teplo, které kotel vyrobí při minimálním výkonu, teplo, které je dodané v palivu, náklady na vyrobené teplo, cena prodaného tepla, výnosy z vyrobeného tepla, elektrický výkon. Následují výnosy z prodeje elektřiny a náklady na provoz teplárny. V posledním řádku jsou celkové výnosy z prodeje elektřiny a tepla při výrobě na minimální výkon kotle. Nejsou zde zahrnuty náklady na mzdy, odpisy a jiné výdaje. Je to z důvodu, že jsou výsledky vztaženy k jedné hodině provozu kotle. Při potřebě zvýšení ročního využití kotle K5 je počítáno s hodnotami vztaženými k hodině provozu, protože doba provozu je závislá na počasí.

### **3 Chlazení zpáteční větve horkovodu s využitím stávajícího výměníku tepla 250 m<sup>2</sup> a chladicího okruhu TG**

#### **3.1 Popis**

Tento způsob zvýšení ročního využití kotle K5 spočívá v práci kotle na minimální výkon a následném chlazení zpáteční větve horkovodu, protože je minimální výkon v přechodném období stále vysoký. Snížení teploty zpáteční větve horkovodu má za následek, že je možné kotel používat dále alespoň na minimální výkon. Jedná se ovšem o ztrátový provoz, kde se všechno vyrobené teplo pošle zákazníkovi, ten ale všechno teplo nevyužije a horká voda o vysoké teplotě se vrací zpátky do teplárny. V případě snížení odběru tepla pod minimální výkon kotle K5 je nutnost přejíždět na kotel K3 s horšími emisními limity a nižší účinností kotle.

Teplárna dodává teplo do městské sítě SATT, a.s. a do firemní sítě ŽĐAS, a.s.. Přehříváný horkovod je v areálu ŽĐAS, a.s., kde je rozdělen na tři menší větve. Jeden z dílčích horkovodů (H5-Z) je využíván pouze v zimě, na zbytek roku se odstavuje. Zbývající dva horkovody, CEL a JV CEL, jsou v provozu celý rok. Všechny tři horkovody jsou zavedeny do sběrače kde je horká voda promíchána. Za normálních podmínek, když se potrubí horkovodu nepřehřívá, je horká voda smíchána se zpáteční větví městského horkovodu SATT, a.s. a dále je vedena přímo do výměňkové stanice, kde se opět ohřívá a pokračuje v systému zásobování teplem.

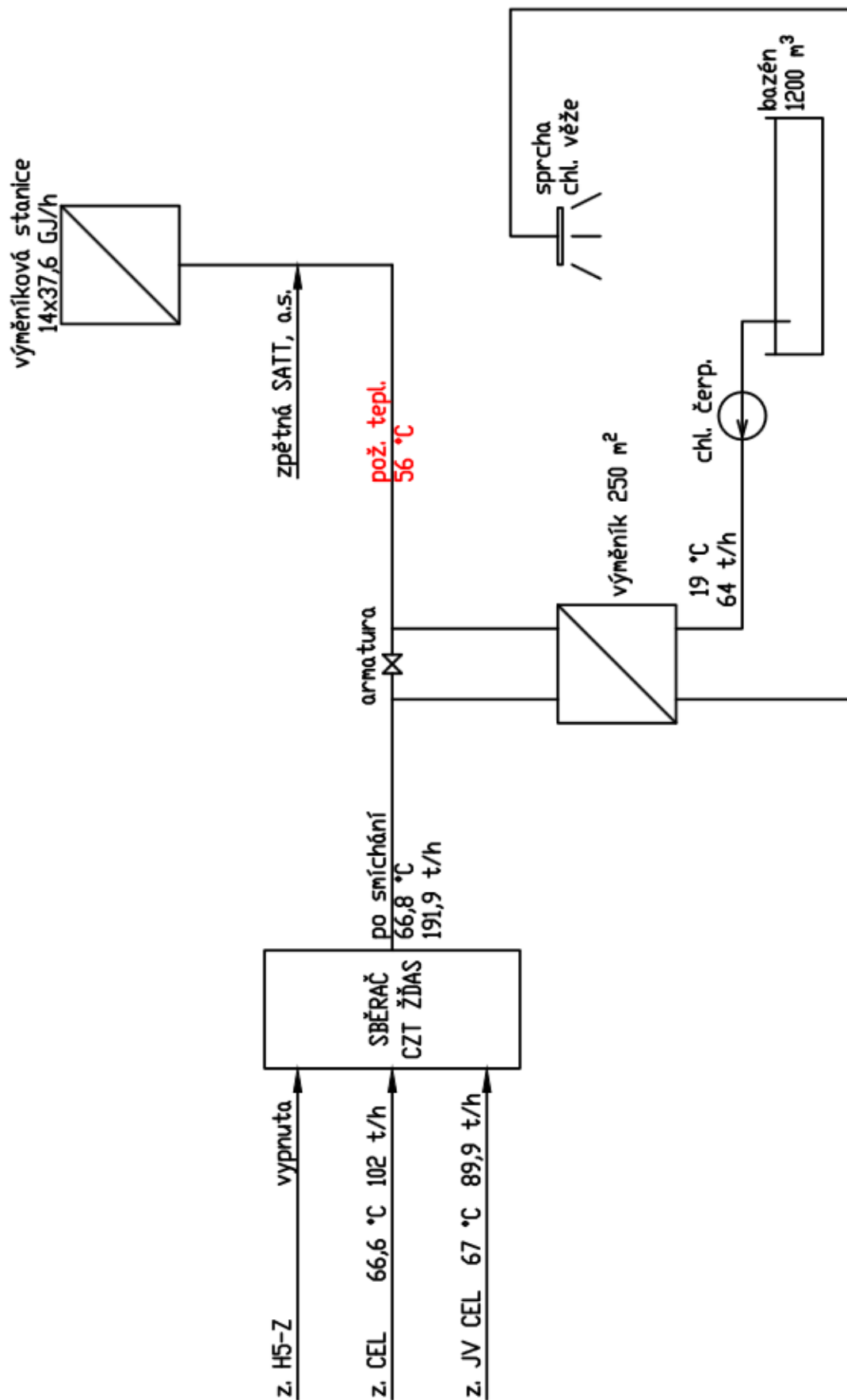
V případě, kdy se horkovod přehřívá, je zapotřebí snížit teplotu horké vody ve vratném potrubí, aby mohl kotel K5 vyrábět páru alespoň na minimální výkon. Ke chlazení tohoto potrubí je použitý výměník tepla o teplosměnné ploše 250 m<sup>2</sup>, kde se předává teplo do chladicí vody. Ta je napojena na chladicí okruh turbogenerátoru a vyvedena do chladicí věže.

Chlazení horké vody je realizováno puštěním veškeré horké vody ze zpětné větve do chladicího výměníku, kde se ochladí na požadovanou teplotu. Ochlazená voda pokračuje ke smíchání s větví SATT, a.s. a do výměňkové stanice teplárny. Ohřátá chladicí voda je čerpána chladicím okruhem turbogenerátoru do chladicí věže, aby měla požadovanou teplotu pro chlazení a tento způsob zvýšení ročního využití kotle K5 byl možný používat i delší dobu.

#### **3.2 Bilanční schéma**

V bilančním schématu této varianty jsou zobrazeny hodnoty zadané pro výpočet, teploty a průtoky horké a chladicí vody. Na vstupu jsou vratné potrubí horkovodu ze sítě ŽĐAS, a.s., které ústí do sběrače CZT ŽĐAS, kde se voda promíchá a přes chladicí výměník tepla pokračuje směrem k výměňkové stanici. Před výměňkovou stanicí se připojí horkovod městské sítě SATT, a.s. a smíchaná voda pokračuje do výměňkové stanice. Na chladicí straně výměníku tepla je použita voda z bazénu chladicí věže, která vstupuje do výměníku, zde převezme teplo od horké vody a vrací se zpátky přes sprchy chladicí věže do bazénu.

Hlavní a požadovanou hodnotou ve výpočtu je teplota ochlazené zpáteční větve horkovodu, která je zvýrazněna červeně. Tato teplota je v následných výpočtech brána jako konstanta, protože této teploty chceme dosáhnout po ochlazení zpáteční větve horkovodu. Průtok chladicí vody je přibližně třikrát menší než průtok horké vody, čili se teplota může poměrně rychle zvýšit. Dále je zde zásobník vody o objemu 1200 m<sup>3</sup>, což také nasvědčuje, že může dojít k rychlému ohřevu chladicí vody. Na pravé straně je zobrazena sprcha se třemi rameny, je tedy možnost použití jednoho, dvou nebo tří ramen v chladicí věži. To vede k rozdílnému vychlazení chladicí vody. Při použití pouze jednoho ramene sprchy nastává největší rozdíl, naopak je tomu při chlazení přes více ramen.



Obr. 8 Bilanční schéma s chladícím výměníkem

### 3.3 Výpočet chladicího výkonu

Základní veličiny pro výpočet předaného tepla jsou v tabulce 14. Další hodnoty potřebné do výpočtů je minimální parní výkon kotle K5, náklady a výnosy z výroby tepla a elektřiny. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11. Teploty a množství horké vody jsou změřené za provozu v den, kdy bylo zapotřebí snížit teplotu horkovodu. Teplota a množství chladicí vody a výroba na kotli K5 v podobě tepla a páry. Tato výroba je zde uvedena pro následný výpočet množství páry na kotli, které odpovídá vypočtenému předanému teplu za daných podmínek. Výroba je brána z dubna 2016, protože se jednalo o přechodné období a hodnoty odpovídají výrobě na kotli K5 při přehřívání zpáteční větve horkovodu.

Tab. 14 Zadané hodnoty pro výpočet tepla [1]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Požadovaná teplota zpátečky	$t_{pož}$	56	°C
Teplota zpátečky CEL	$t_{z1}$	66,6	°C
Teplota zpátečky JV CEL	$t_{z2}$	67	°C
Množství zpátečky CEL	$m_1$	102	t/h
Množství zpátečky JV CEL	$m_2$	89,9	t/h
Teplota chladicí vody	$t_{chl}$	19	°C
Množství chladicí vody	$m_{ch}$	64	t/h
Vyrobené teplo na K5 04/2016	$Q_{4/16}$	12152	GJ
Vyrobená pára na K5 04/2016	$m_{4/16}$	4337	t/h

Pro výpočet je zapotřebí znát ještě měrnou tepelnou kapacitu vody. Tato hodnota je brána jako konstantní, přestože se v závislosti na teplotě mění nepatrně. Její označení a velikost je  $c = 4180 \text{ J/kgK}$  [4].

Množství horké vody ve zpáteční větvi horkovodu ŽĐAS, a.s.

$$m_z = m_1 + m_2 = 102 + 98,9$$

$$m_z = 191,9 \text{ t/h}$$

Teplota zpátečky po promíchání

$$t_z = \frac{t_{z1} \cdot m_1 + t_{z2} \cdot m_2}{m_z} = \frac{66,6 \cdot 102 + 67 \cdot 89,9}{191,9}$$

$$t_z = 66,8 \text{ °C}$$

Předané teplo z horkovodu

$$Q_1 = \frac{m_z \cdot c \cdot (t_z - t_{pož})}{1000000} = \frac{191,9 \cdot 4180 \cdot (66,8 - 56)}{1000000}$$

$$Q_1 = 8,65 \text{ GJ/h}$$

$$Q_1' = \frac{Q_1}{3,6} = \frac{8,65}{3,6}$$

$$Q_1' = 2,4 \text{ MW}$$

Odpovídající množství páry vyrobené na kotli

$$m_{p1} = Q_1 \cdot \frac{m_{4/16}}{Q_{4/16}} = 8,65 \cdot \frac{4337}{12152}$$

$$m_{p1} = 3,09 \text{ t/h}$$

Velikost teoreticky sníženého výkonu kotle K5

$$m_{P1} = m_p - m_{p1} = 18 - 3,09$$

$$m_{P1} = 14,91 \text{ t/h}$$

Teplota chladicí vody beze ztrát

$$t_{ch2} = t_{ch1} + \left( \frac{Q_1 \cdot 1000000}{c \cdot m_{ch}} \right) = 16 + \left( \frac{8,65 \cdot 1000000}{4180 \cdot 64} \right)$$

$$t_{ch2} = 51,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Rozdíl teplot chladicí vody

$$\Delta t_{ch} = t_{ch2} - t_{ch1} = 51,35 - 19$$

$$\Delta t_{ch} = 32,35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

V tabulce 15 jsou zapsány hodnoty výpočtů. Tyto výsledky jsou dosažené stejným výpočtem, který je zobrazen výše. V prvním řádku jsou teploty zpátečky, které je potřeba snížit na požadovanou teplotu. Teplota začíná na požadované hodnotě zpáteční větve horkovodu ŽĐAS, a.s., 56 °C, kdy se nebude chladit. Dále je po 2 °C teplota horkovodu zvyšována do teploty 70 °C. V druhém a třetím řádku je vypočítané teplo, které je potřeba předat ve výměníku z horké vody do chladicího okruhu v GJ/h a MW. Následující řádek zaznamenává množství přehřáté páry vyrobené na kotli, které odpovídá předanému teplu. Potom je zaznamenán teoreticky snížený parní výkon kotle. Následuje teplota chladicí vody po ohřátí a rozdíl teplot chladicí vody na vstupu a na výstupu z výměníku.

Tab. 15 Hodnoty výpočtu tepla chlazení zpátečky pomocí výměníku tepla

$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$Q_1$ [GJ/h]	0	1,6	3,21	4,81	6,42	8,02	9,63	11,23
$Q_1'$ [MW]	0	0,45	0,89	1,34	1,78	2,23	2,67	3,12
$m_{p1}$ [t/h]	0	0,57	1,15	1,72	2,29	2,86	3,44	4,01
$m_{P1}$ [t/h]	18	17,43	16,85	16,28	15,71	15,14	14,56	13,99
$t_{ch2}$ [°C]	19	25	30,99	36,99	42,99	48,98	54,98	60,98
$\Delta t_{ch}$ [°C]	0	6	11,99	17,99	23,99	29,98	35,98	41,98

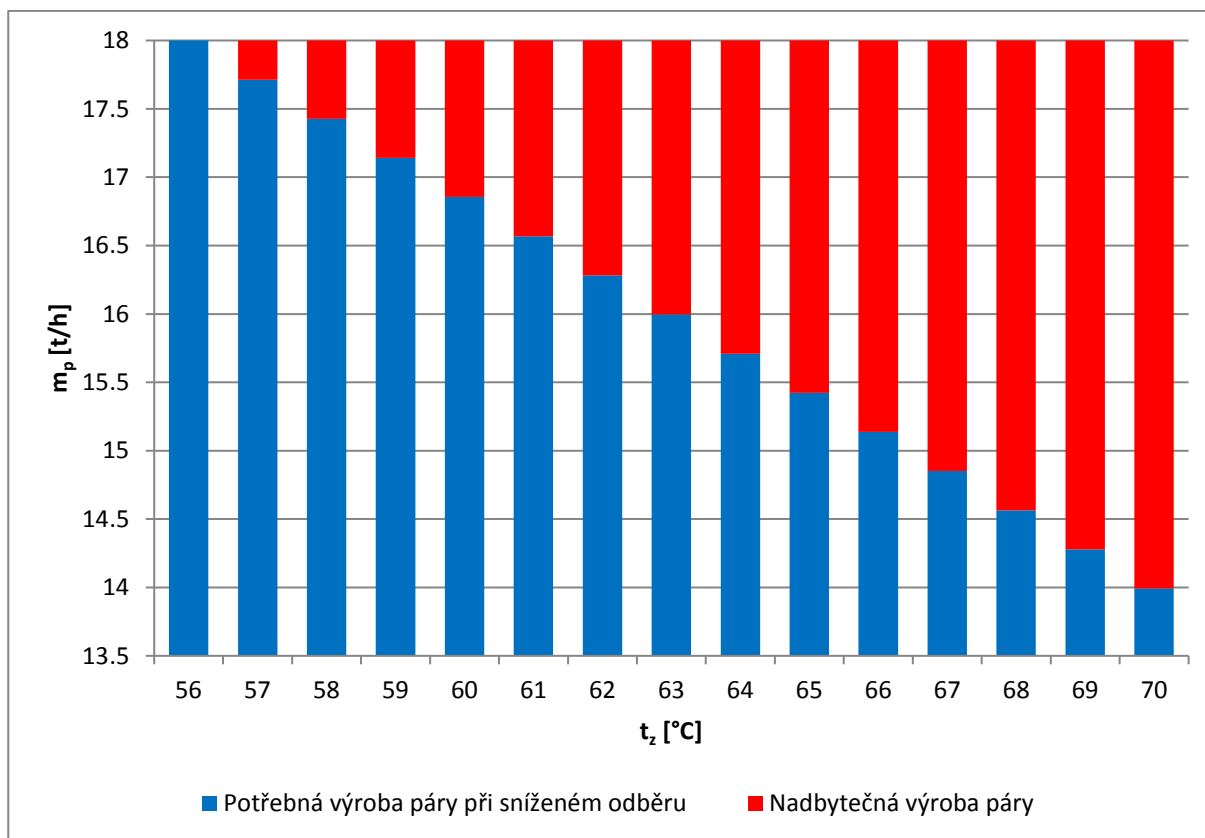
Při sníženém odběru tepla, vlivem vyšší teploty okolí, nastává, že se teplota chladicí vody zvýší jak vlivem okolí, tak chlazením horkovodu o vyšší teplotě. Výpočet je zaznamenán do teploty zpáteční větve horkovodu 70 °C při stálé teplotě chladicí vody 19 °C. Při takové teplotě horkovodu je zapotřebí předat poměrně velké množství tepla. V takovéto situaci není jisté, zda-li bude chladicí voda chladit dostatečně, protože lze předpokládat, že se za daných

podmínek voda nevychladí na požadovanou teplotu. Za vyšší teploty vstupní chladicí vody se bude chladicí voda ohřívat na vyšší teploty, až přestane mít dostatečný chladicí účinek.

Naopak, když bude teplota okolí klesat, bude vyšší odběr tepla a teplota zpáteční větve horkovodu bude klesat k požadovaným 56 °C. Z toho vyplývá, že budou nižší chladicí výkony a tomu odpovídá nižší množství "zbytečně" vyrobené páry.

Z výsledků je také patrné, že se teplota chladicí vody zvýší přibližně třikrát více, než se ochladí horká voda v horkovodu. To odpovídá vlastnostem vody, kdy je výpočet závislý na měrné tepelné kapacitě vody, průtoku vody a rozdílu teplot. Měrná tepelná kapacita je ve výpočtu stejná pro horkou i pro chladicí vodu, protože se v daném teplotním rozmezí mění velice málo. Závislost je tedy na dalších dvou veličinách a to průtoku vody a teplotě vody. Průtok vody horkovodem je přibližně třikrát vyšší než průtok chladicí vody čili ochlazení horké vody o 1 °C znamená ohřátí chladicí vody zhruba o 3 °C.

Na obrázku 9 je zobrazena závislost vyrobené páry na kotli na teplotě zpáteční větve horkovodu. Vychlazení horkovodu o každý stupeň znamená nadbytečnou výrobu páry v kotli K5 přibližně o 0,29 t/h. V grafu je zobrazeno modrou barvou potřebný parní výkon, aby nedocházelo k přehřívání. Červenou barvou je zobrazen přebytek výroby páry na kotli K5, který pracuje v režimu minimálního výkonu.



Obr. 9 Závislost vyrobené páry na teplotě zpáteční větve horkovodu

### 3.4 Ekonomický výpočet

Finanční stránka této metody je počítána pouze do chlazení horké vody o teplotě 70 °C. Z předchozích výpočtů je vidět, že při tomto chlazení zpáteční větve horkovodu se chladicí voda velmi ohřívá a nejsou zaručeny stejné podmínky pro odvod tepla. Výpočet je proveden s hodnotami nadbytečně vyrobeného tepla z tabulky 15, což odpovídá i množství vyrobené



páry. Jelikož se jedná o nadbytečnou výrobu, výsledkem je ztráta při tomto provozu. Do výpočtu financí je také zahrnuta práce turbíny, která vyrábí elektrickou energii, spotřeba teplárny a práce chladicího čerpadla. Při provozu kotle K5 turbína vyrábí elektrickou energii z minimálního výkonu, tj. 18 t/h páry. Výnosy jsou ze sníženého odběru tepla a výroby elektřiny na turbogenerátoru. Jako ztráty je brána vlastní spotřeba teplárny, protože se ve výpočtech projevuje negativně. Další ztráta je práce chladicího čerpadla, které je v provozu při použití chladicí věže a náklady na výrobu tepla.

Příkon zmíněného čerpadla pro cirkulaci chladicí vody je  $P_{\text{č}} = 80 \text{ kW}$ .

Ztráty při chlazení horkovodu přes výměník

$$Z_1 = V_Q \cdot Q_1 = 213 \cdot 8,65$$

$$Z_1 = 1843,1 \text{ K}\check{\text{h}}$$

Náklady na spotřebu chladicího čerpadla

$$N_{\text{č}} = P_{\text{č}} \cdot V_{\text{el}} = 80 \cdot 1,8$$

$$N_{\text{č}} = 144 \text{ K}\check{\text{h}}$$

Celkové výnosy při chlazení horkovodu přes výměník

$$V_1 = V_{\text{CK5}} - Z_1 - N_{\text{č}} = 6710,5 - 1843,1 - 144$$

$$V_1 = 4273,4 \text{ K}\check{\text{h}}$$

Tabulka 16 zaznamenává náklady na práci chladicího čerpadla, ztráty při chlazení výměníku tepla a celkové výnosy při tomto způsobu chlazení v závislosti na teplotě zpáteční větve horkovodu. Náklady na práci cirkulačního čerpadla jsou konstantní, čerpadlo je v tomto případě v nepřetržitém provozu, aby se dostatečně vychladila chladicí voda. Dále zde jsou ztráty při tomto provozu chlazení zpáteční větve horkovodu. V posledním řádku jsou zaznamenány výnosy při provozu tohoto způsobu zvýšení ročního využití kotle K5.

Tab. 16 Hodnoty ekonomického výpočtu chlazení zpáteční větve horkovodu výměníkem tepla v závislosti na teplotě přehřívání zpátečky

$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$m_{\text{PI}}$ [t/h]	18	17,43	16,85	16,28	15,71	15,14	14,56	13,99
$N_{\text{č}}$ [Kč/h]	144							
$Z_1$ [Kč/h]	0	341,7	683,4	1025,1	1366,8	1708,6	2050,3	2392
$V_1$ [Kč/h]	6566,5	6224,8	5883,1	5541,3	5199,6	4857,9	4516,2	4174,5

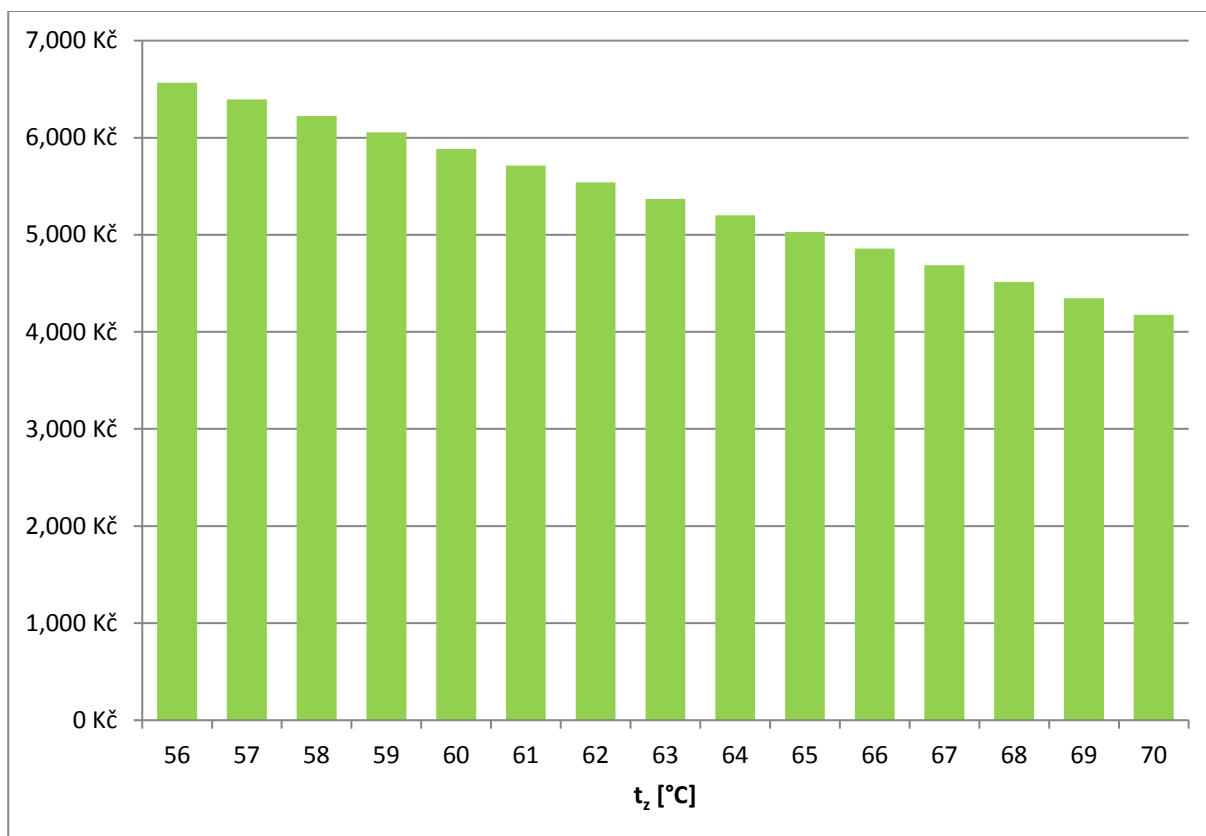
Náklady na práci čerpadla jsou konstantní celou dobu chlazení. Je nutné, aby čerpadlo bylo v provozu nepřetržitě, ne jenom při chlazení, aby se chladicí voda vychladila dostatečně. Další hodnotou v tabulce jsou ztráty, které odpovídají množství tepla, které je zapotřebí odvést, aby se horkovod nepřehřival. Tyto ztráty se zvyšují se snižujícím se odběrem, tedy zvyšující se teplotou horkovodu. Ztráty znázorňují cenu tepla, které je odvedeno do chladicího okruhu. V posledním řádku jsou celkové výnosy při použití chlazení horkovodu pomocí výměníku tepla. Do tohoto výsledku zasahuje velikost výnosů při výrobě

na minimální výkon, kdy je konstantní výroba elektřiny i tepla, od které se odečte cena práce cirkulačního čerpadla a velikost ztrát při tomto chlazení horkovodu.

Z nepřetržité práce cirkulačního čerpadla vyplývá, že při tomto zvýšení ročního využití kotle K5 jsou sníženy výnosy i v případě, kdy se horkovod nepřehřívá, protože cirkulační čerpadlo je stále v provozu.

Výnosy jsou nižší o cenu práce cirkulačního čerpadla a úměrně se snižují se sníženým odběrem tepla.

Na obrázku 10 je zobrazena závislost celkových výnosů teplárny na teplotě zpáteční větve horkovodu. Ve výnosech jsou zahrnuty ziskové položky jako je prodej tepla a elektrické energie. Ztrátové položky jsou náklady na vlastní spotřebu teplárny, ztráta z nadbytečně vyrobeného tepla a náklady na práci cirkulačního čerpadla.



Obr. 10 Celkové výnosy za hodinu při chlazení zpáteční větve horkovodu výměníkem

### 3.5 Zhodnocení

Tato metoda zvýšení ročního využití kotle K5 je založena na chlazení zpětné větve horkovodu a práci kotle K5 na minimální výkon. Toto chlazení má za následek, že kotel K5 může být v provozu na minimální výkon delší dobu, ale vyrobí nadbytek tepla. Na první pohled to vypadá, že se jedná o ztrátový provoz. Nicméně, je požadavek na vyšší roční využití kotle K5 a ve srovnání s kotlem K3, na který by se v případě potřeby přejíždělo, je tato výroba požadována. Je to hlavně z důvodu nižší účinnosti kotle K3 a omezených pracovních hodin za rok. Zde do výpočtu vstupuje více položek. První je vyrobené teplo, kterého je na kotli K5 vyrobeno nadbytek a je zapotřebí nadbytečné teplo odvést. Na kotli K3 je vyrobeno množství tepla, které odpovídá požadovanému odběru. Druhá položka je vyrobená elektřina, kde na kotli K5 se vyrábí elektřina konstantně při minimálním výkonu, ale na kotli K3 se snižuje

výkon, čili se snižuje i výroba elektřiny. Obě tyto položky mají vliv na výslednou finanční stránku. Další faktor ovlivňující výnosy je práce cirkulačního čerpadla, které je v případě chlazení horkovodu v provozu nepřetržitě, aby se zachovaly teploty vody použité na chlazení.

Výroba na kotli K5 a následné chlazení je ovšem závislé na chladícím okruhu, který je schopen pojmout pouze určité množství tepla a následně nebude dostatečným chladícím účinek. Teplota chladící vody má tedy velký vliv na tuto metodu zvýšení ročního využití kotle K5. Je to dáno vlastnostmi vody, kdy v horkovodu je velké množství a v chladícím okruhu přibližně třikrát menší a to má za následek, že se chladící voda ohřeje zhruba o 3 °C na vychlazení horkovodu o 1 °C. V objemu chladící vody je velice pravděpodobné, že při delším používání tohoto chlazení horkovodu nastane, že se chladící voda nevychladí dostatečně a nebude odebírat teplo z horkovodu. Z toho vyplývá, že se tato metoda dá používat pouze určitou dobu, dokud nedojde k ohřátí chladící vody nad přípustnou mez. Při provozu této metody je zapotřebí, aby chladící voda cirkulovala i v době, kdy se toto chlazení nebude využívat, aby se teplota snížila. Poté je možné toto řešení chlazení horkovodu používat i další dny.

Výnosy z výroby na kotli K5 a následného chlazení jsou závislé na množství tepla, které je zapotřebí odvést, aby se horkovod nepřehříval. Toto teplo je tedy přímá ztráta teplárny. Protože se v tomto případě na kotli K5 vyrábí na minimální výkon, jsou zde stále příjmy z vyrobené elektřiny. Vlastní spotřebu elektrické energie teplárna pokryje z výroby na turbogenerátoru, nadbytek elektřiny je rozveden do areálu ŽĎAS, a.s.. Zde se mění spotřeba na výrobě tepla, čili v zimě bude vyšší spotřeba a naopak v létě bude spotřeba nízká. Tyto náklady jsou ovšem stejné při výrobě tepla na kotli K3. Další zápornou položkou v systému je cirkulační čerpadlo, které je v provozu nepřetržitě, aby byly zachovány vlastnosti vody pro chlazení.

Výsledky výpočtů jsou vztaženy k jedné hodině. Náklady na práci cirkulačního čerpadla jsou celodenní, ale ztráty z vyrobeného tepla jsou pouze v případě sníženého odběru. Tato ztráta se zvyšující teplotou okolí se také zvyšuje a má velký vliv na celkové výnosy teplárny.

## **4 Kondenzace části páry z protitlaku TG4 v kondenzátoru odstavené kondenzačně odběrové turbíny AT6 Škoda Plzeň**

### **4.1 Popis**

Tato metoda zvýšení ročního využití kotle K5 je založena na obdobném principu jako předchozí způsob. Práce kotle K5 na minimální výkon a následné odvedení dostatečného množství tepla ve formě páry do kondenzátoru, aby nedošlo k přehřívání zpětné větve horkovodu. V tomto případě se opět vyrábí pára v kotli K5 na minimální výkon. Tentokrát pára vyrobená na kotli expanduje v turbíně, ale ne všechna proudí do výměňkové stanice. Část páry za turbínou je odvedena do kondenzátoru odstavené kondenzačně odběrové turbíny AT6 Škoda Plzeň, kde zkondenzuje. Ke kondenzaci je opět využitý chladicí okruh TG. Zde se opět jedná o ztrátový provoz, který vyrábí nadbytek tepla, které se nevyužije pro dodávku tepla. Jelikož se část páry odvede před výměňkovou stanicí do kondenzátoru, tak se předá méně tepla odpovídajícímu nižšímu odběru tepla.

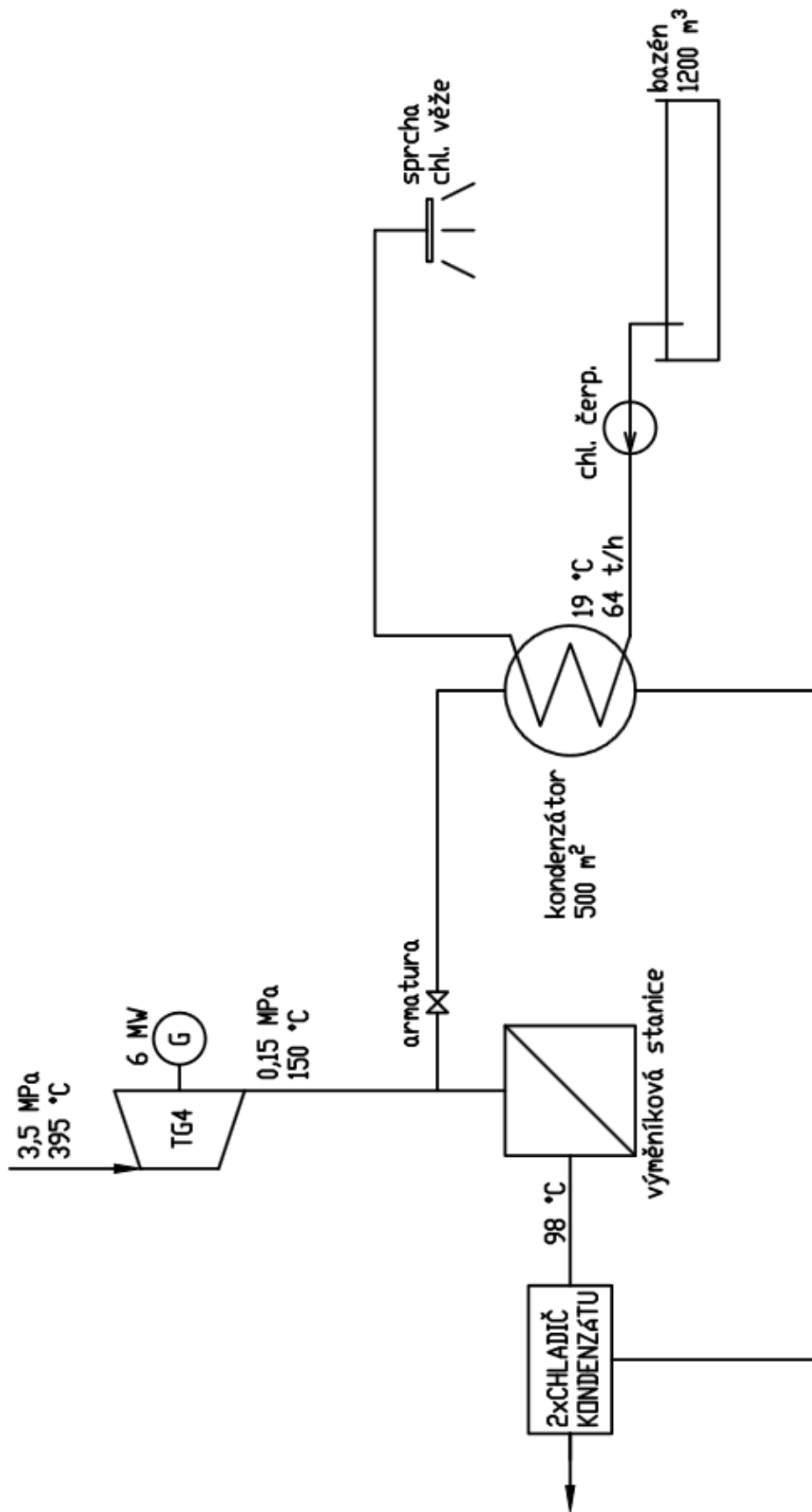
Za normálních podmínek, kdy se vyrábí na vyšší než minimální výkon, všechna pára proudí přes turbínu do výměňkové stanice, kde předá teplo, zkondenzuje a pokračuje do napájecích nádrží. V závislosti na odběru se zapojují výměníky ve výměňkové stanici, kde na nejvyšší výkon pojede nejvíce výměníků a se snižováním výkonu se snižuje i počet výměníků v provozu. Za výměňkovou stanicí, kondenzát vzniklý z páry, je dopravován do chladičů kondenzátu a voda koluje v systému.

V případě sníženého odběru, kdy se horkovod přehřívá, se na kotli K5 vyrobí minimální množství páry, které expanduje v turbíně na nižší tlak a za turbínou je zapotřebí proud páry rozdělit. Hlavní proud je stále zaveden do výměňkové stanice, kde předává teplo horké vodě a vedlejší proud páry ústí do kondenzátoru o teplosměnné ploše 500 m<sup>2</sup>. Zmíněné rozdělení toku páry se zajistí umístěním škrtícího ventilu před kondenzátor. Ten páru škrtí tak, aby byly potřebné parametry páry za turbínou i požadované toky do kondenzátoru a výměňkové stanice dodrženy.

### **4.2 Bilanční schéma**

Bilanční schéma znázorňuje základní hodnoty k výpočtu, tlak a teplotu páry za turbínou, teplotu zkondenzované páry za výměňkovou stanicí a teplotu a množství chladicí vody. Další hodnoty zde nejsou vyznačeny, ale je počítáno se stejným množstvím tepla, které je potřeba odvést, aby nedocházelo k přehřívání horkovodu. Toto teplo je spočítáno v předchozí variantě zvýšení ročního využití kotle K5 a odpovídá jednotlivým teplotám přehřátého horkovodu. Další velice důležitá součást ve schématu je armatura. Jedná se o škrtící ventil, který určuje parametry páry za turbínou a množství páry, které proudí do kondenzátoru. Kondenzát je následně zaveden do chladiče kondenzátu a cirkuluje v systému výroby tepla. Chladicí okruh je stejný jako v předchozím případě, tedy je chladicí voda brána z bazény chladicí věže. V kondenzátoru odebere teplo páře a přes sprchy chladicí věže se vrací do zásobního bazénu.

Ve výpočtu je tedy brána jako hlavní hodnota množství tepla, o které je potřeba předat méně ve výměňkové stanici. Toto teplo je v podobě páry zavedeno přes škrtící ventil do kondenzátoru, kde zkondenzuje a teplo předá chladicí vodě. Výsledkem výpočtu je množství vyrobené páry, které odpovídá teoreticky sníženému výkonu a ekonomické zhodnocení.



Obr. 11 Bilanční schéma s kondenzátorem

### 4.3 Výpočet množství páry puštěné do kondenzátoru a chladícího výkonu

V tomto výpočtu je bráno stejné množství tepla, které odpovídá stejnému snížení teploty horkovodu jako v předchozí metodě zvýšení ročního využití kotle K5. O toto teplo je potřeba předat méně ve výměňkové stanici, aby nedocházelo k přehřívání horkovodu při snížených odběrech tepla. Výsledkem výpočtů je množství páry, kterou je zapotřebí odvést mimo výměňkovou stanici do kondenzátoru, aby nepředávala teplo horké vodě. Ukázkový výpočet je pro stejné snížení teploty zpáteční větve horkovodu z 66,8 °C na 56 °C při stejném množství horké vody 191,9 t/h.

Tab. 17 Známé hodnoty pro výpočet tepla [1]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Předané teplo ve VS	$Q_1'$	2,4	MW
Předané teplo ve VS	$Q_1$	8,65	GJ/h
Teplota protitlaké páry	$t_R$	150	°C
Tlak protitlaké páry	$p_R$	0,15	MPa
Entalpie protitlaké páry	$i_R$	2772,9	kJ/kg
Teplota chladicí vody	$t_{chl}$	19	°C
Množství chladicí vody	$m_{ch}$	64	t/h
Měrná tepelná kapacita vody	$c$	4180	J/kgK
Teplota kondenzátu za VS	$t_{vs}$	98	°C
Teplota nedohřevu	$t_n$	4	°C

Hodnoty potřebné k výpočtu jsou v tabulce 17. Z předchozích výpočtů je zde předané teplo ve výměňkové stanici, teplota, tlak a entalpie protitlaké páry, teplota a množství chladicí vody a měrná tepelná kapacita. Dále je zde teplota zkondenzované páry za výměňkovou stanici a teplota nedohřevu v kondenzátoru.

Pro výpočet množství páry je potřeba znát entalpii zkondenzované páry za výměňkovou stanici, ta je funkcí teploty za VS a její hodnota je  $i_{vs} = 410,7 \text{ kJ/kg}$ .

Množství páry odvedené do kondenzátoru

$$m_{p2} = \frac{Q_1 \cdot 1000}{i_R - i_{vs}} = \frac{8,65 \cdot 1000}{2772,9 - 410,7}$$

$$m_{p2} = 3,66 \text{ t/h}$$

Velikost teoreticky sníženého výkonu kotle K5

$$m_{p2} = m_p - m_{p2} = 18 - 3,66$$

$$m_{p2} = 14,34 \text{ t/h}$$

Dále je zapotřebí znát vlastnosti kondenzátu vzniklého v kondenzátoru. Tyto hodnoty byly vypočteny iteračně podle následujícího výpočtu. Nejprve byla zvolena teplota chladicí vody podle výpočtu s výměňkem tepla a dále byly hodnoty dopočteny.

Teplota kondenzátu

$$t_k = t_{ch2} + t_n = 53,66 + 4$$

$$t_k = 57,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entalpie kondenzátu je funkcí teploty kondenzátu.

$$i_k = 241,4 \text{ kJ/kg}$$

Chladicí výkon kondenzátoru

$$Q_k = \frac{m_{p2} \cdot (i_R - i_k)}{1000} = \frac{3,66 \cdot (2772,9 - 410,7)}{1000}$$

$$Q_k = 9,27 \text{ GJ/h}$$

Teplota chladicí vody beze ztrát

$$t_{ch2} = t_{ch1} + \left( \frac{Q_k \cdot 1000000}{c \cdot m_{ch}} \right) = 19 + \left( \frac{9,27 \cdot 1000000}{4180 \cdot 64} \right)$$

$$t_{ch2} = 53,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rozdíl teplot chladicí vody

$$\Delta t_{ch} = t_{ch2} - t_{ch1} = 53,66 - 19$$

$$\Delta t_{ch} = 34,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

V tabulce 18 jsou v prvních 3 řádcích zaznamenány vstupní hodnoty do výpočtů, které jsou stejné jako v případě chlazení zpáteční větve horkovodu pomocí výměníku tepla. První řádek odpovídá přehřáté teplotě zpáteční větve od 56 °C do 70 °C, druhý a třetí řádek obsahuje hodnoty, o které je potřeba dodat méně tepla do horké vody, aby se zpáteční větev nepřehřívala v GJ/h a MW.

Další veličiny jsou vypočítané pomocí ukázkového výpočtu. Je zde množství páry, která je odvedená do kondenzátoru, následuje množství páry, které se využije k ohřevu horké vody ve výměňkové stanici. Pokračují vlastnosti kondenzátu, teplota a entalpie, chladicí výkon kondenzátoru, teplota výstupní chladicí vody a rozdíl teplot chladicí vody na vstupu a výstupu z kondenzátoru.

Tab. 18 Zadané a vypočtené hodnoty

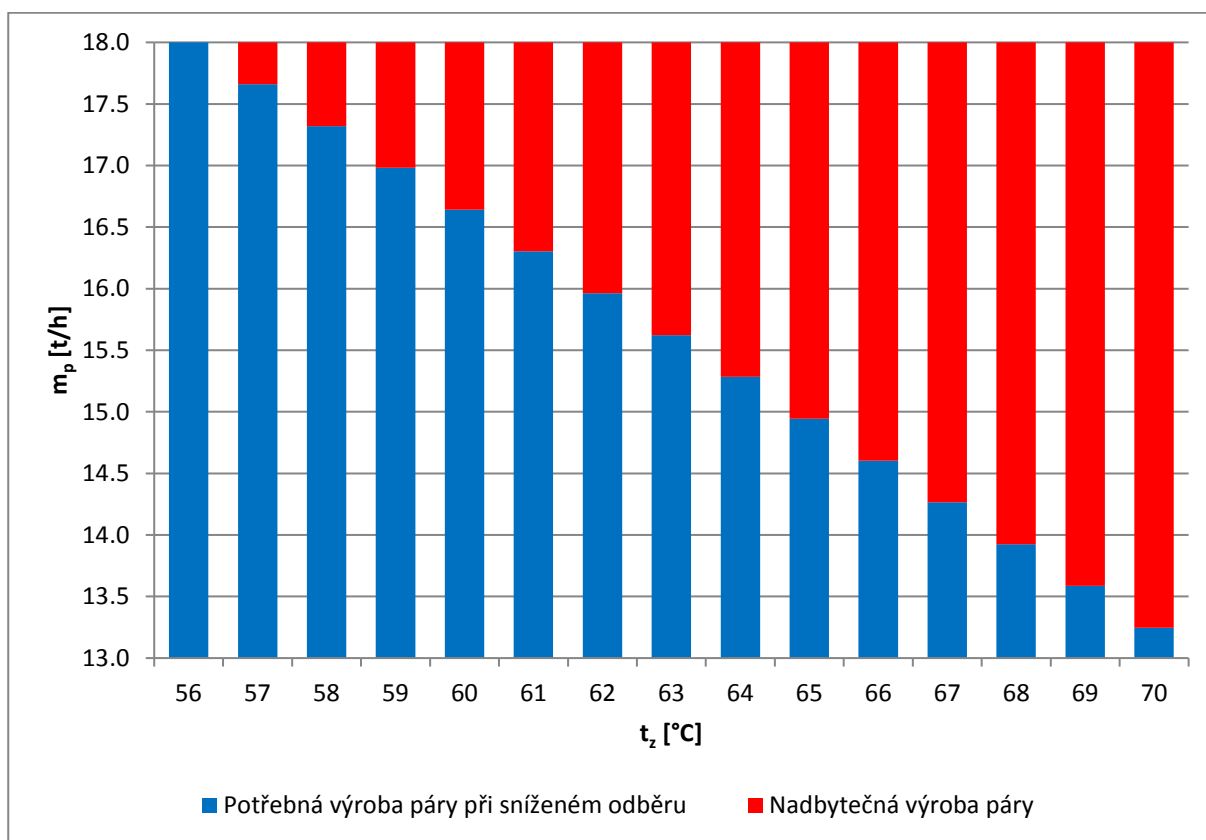
$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$Q_1$ [GJ/h]	0	1,6	3,21	4,81	6,42	8,02	9,63	11,23
$Q_1'$ [MW]	0	0,45	0,89	1,34	1,78	2,23	2,67	3,12
$m_{p2}$ [t/h]	0	0,68	1,36	2,04	2,72	3,4	4,07	4,75
$m_{p2}$ [t/h]	18	17,32	16,64	15,96	15,28	14,6	13,93	13,25
$t_k$ [°C]	23	29,72	36,61	42,76	49,07	55,26	61,33	67,27
$i_k$ [kJ/kg]	96,5	124,6	152,1	179	205,4	231,3	256,7	281,6
$Q_k$ [GJ/h]	0	1,8	3,56	5,28	6,97	8,63	10,25	11,84
$t_{ch2}$ [°C]	19	25,72	32,31	38,76	45,07	51,26	57,33	63,27
$\Delta t_{ch}$ [°C]	0	6,72	13,31	19,76	26,07	32,26	38,33	44,27

V případě sníženého odběru tepla vlivem vyšší teploty okolí nastává, že se teplota chladicí vody zvýší jak vlivem okolí, tak chlazením horkovodu o vyšší teplotě. Výpočet je proveden do teoretické teploty zpáteční větve horkovodu 70 °C při stálé teplotě chladicí vody 19 °C. Při takové teplotě horkovodu je zapotřebí předat poměrně velké množství tepla. V takové situaci není jisté, zda-li bude chladicí voda chladit dostatečně, protože lze předpokládat, že se za daných podmínek voda nevychladí na požadovanou teplotu. Za vyšší teploty vstupní chladicí vody se bude chladicí voda ohřívat na vyšší teploty, až přestane mít dostatečný chladicí účinek.

Naopak, když bude teplota okolí klesat, bude vyšší odběr tepla a teplota zpáteční větve horkovodu bude klesat k požadovaným 56 °C. Z toho vyplývá, že budou nižší chladicí výkony a tomu odpovídá nižší množství nadbytečně vyrobené páry.

Výsledky zobrazují obdobné hodnoty jako v případě chlazení zpáteční větve horkovodu pomocí chladicího výměníku. Je zde ovšem vyšší množství páry, které se kondenzuje v kondenzátoru, je tedy potřeba vyšší chladicí výkon. To má za následek, že se teplota chladicí vody při stejném množství odebraného tepla ohřeje více, jako v případě použití chladicího výměníku.

Na obrázku 12 je zobrazena závislost vyrobené páry na kotli na teplotě zpáteční větve horkovodu. Vychlazení horkovodu o každý stupeň znamená nadbytečnou výrobu páry v kotli K5 přibližně o 0,32 t/h. V grafu je zobrazen modrou barvou potřebný parní výkon, aby nedocházelo k přehřívání. Červenou barvou je zobrazen přebytek výroby páry na kotli K5, který pracuje v režimu minimálního výkonu. Tato přebytečná pára proudí do kondenzátoru a kondenzuje.



Obr. 12 Závislost vyrobené páry na teplotě zpáteční větve horkovodu



#### 4.4 Ekonomický výpočet

Finanční stránka této metody je počítána pouze do chlazení 70 °C horké vody. Z předchozích výpočtů je vidět, že při tomto způsobu zvýšení ročního využití kotle K5 se velmi ohřívá chladicí voda a nejsou zaručeny stejné podmínky v kondenzátoru pro odvod tepla. Výpočet je proveden se stejnými hodnotami tepla jako v případě chlazení zpáteční větve horkovodu. Ekonomický výpočet této metody je prakticky stejný jako je v případě chlazení horkovodu pomocí výměníku tepla o teplosměnné ploše 250 m<sup>2</sup>. Výsledkem je ztráta při tomto provozu, protože se jedná o nadbytečně vyrobené teplo. Do výpočtu financí je také zahrnuta práce turbíny, která vyrábí elektrickou energii, spotřeba teplárny a práce chladicího čerpadla. Při provozu kotle K5 turbína vyrábí elektrickou energii z minimálního výkonu, tj. 18 t/h páry. Výnosy jsou ze sníženého odběru tepla a výroby elektřiny na turbogenerátoru. Ztráty jsou vlastní spotřeba teplárny, práce chladicího čerpadla, které je v provozu při použití chladicí věže a náklady na výrobu tepla.

Ztráty při chlazení horkovodu přes výměník

$$Z_2 = V_Q \cdot Q_1 = 213 \cdot 8,65$$

$$Z_2 = 1843,1 \text{ Kč/h}$$

Náklady na spotřebu chladicího čerpadla

$$N_{\text{č}} = P_{\text{č}} \cdot V_{\text{el}} = 80 \cdot 1,8$$

$$N_{\text{č}} = 144 \text{ Kč/h}$$

Celkové výnosy při chlazení horkovodu přes výměník

$$V_2 = V_{\text{CK5}} - Z_2 - N_{\text{č}} = 6710,5 - 1843,1 - 144$$

$$V_2 = 4273,4 \text{ Kč/h}$$

V tabulce 19 jsou zaznamenány náklady na práci chladicího čerpadla, ztráty při chlazení výměníku tepla a celkové výnosy při tomto způsobu odvodu tepla v závislosti na teplotě zpáteční větve horkovodu, které odpovídá teoreticky sníženému parnímu výkonu kotle. Náklady na práci cirkulačního čerpadla jsou konstantní, čerpadlo je v tomto případě v nepřetržitém provozu, aby se dostatečně vychladila chladicí voda. Dále zde jsou ztráty při tomto provozu chlazení zpáteční větve horkovodu. V posledním řádku jsou zaznamenány výnosy při provozu tohoto způsobu zvýšení ročního využití kotle K5.

Tab. 19 Hodnoty ekonomického výpočtu s použitím kondenzátoru

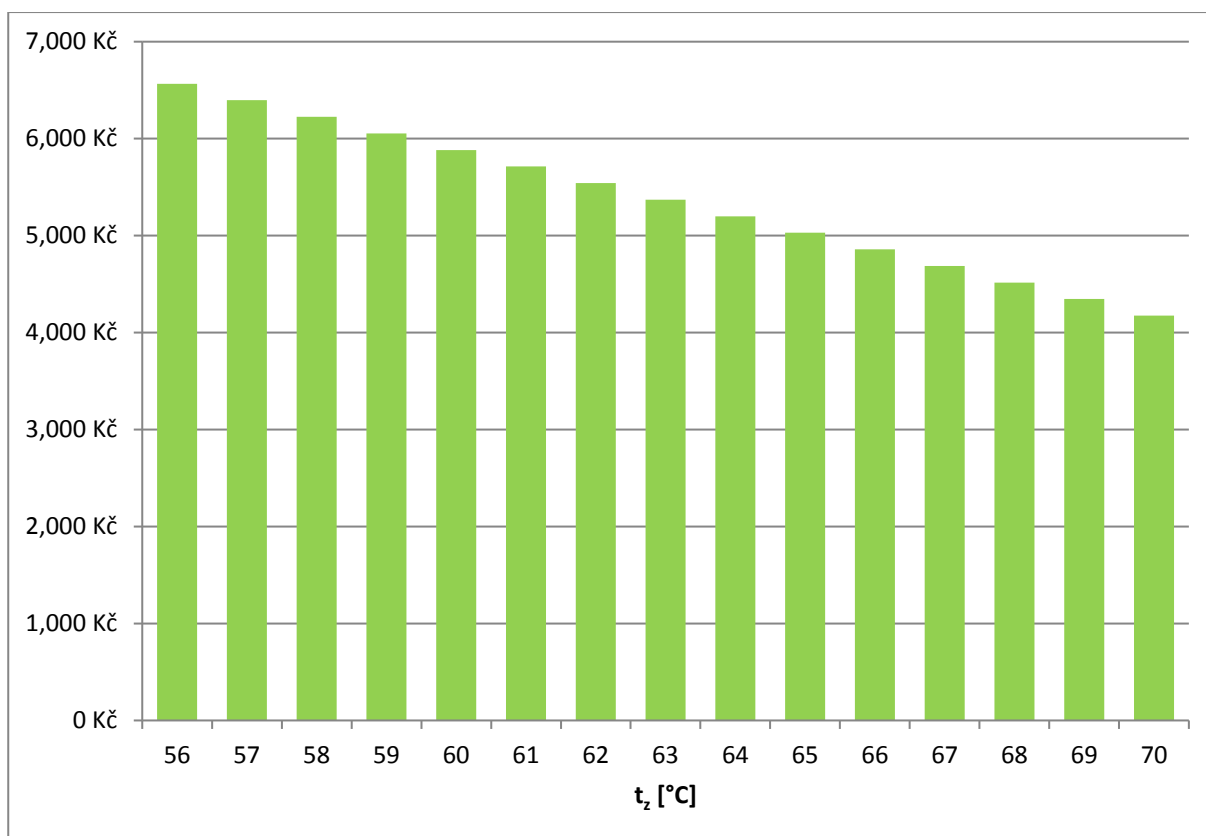
$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$m_{p2}$ [t/h]	18	17,32	16,64	15,96	15,28	14,6	13,93	13,25
$N_{\text{č}}$ [Kč/h]	144							
$Z_2$ [Kč/h]	0	341,7	683,4	1025,1	1366,8	1708,6	2050,3	2392
$V_2$ [Kč/h]	6566,5	6224,8	5883,1	5541,3	5199,6	4857,9	4516,2	4174,5

Ekonomická stránka výpočtu je stejná jako v případě chlazení zpáteční větve horkovodu pomocí výměníku tepla. Náklady na práci čerpadla jsou konstantní celou dobu chlazení. Je třeba, aby čerpadlo bylo v provozu nepřetržitě a chladicí voda se vychladila dostatečně. Další

hodnotou v tabulce jsou ztráty, které odpovídají množství tepla, které je zapotřebí odvést do kondenzátoru, aby se ve výměňkové stanici předalo méně tepla, které je přiměřené odběru. Tyto ztráty se zvyšují se snižujícím se odběrem a znázorňují cenu tepla, které je odvedeno do chladicího okruhu. V posledním řádku jsou celkové výnosy při použití kondenzátoru pro odvod tepla. Do tohoto výsledku zasahuje velikost výnosů při výrobě na minimální výkon, kdy je konstantní výroba elektřiny i tepla, od které se odečte cena práce cirkulačního čerpadla a velikost ztrát při použití kondenzátoru na odvod tepla.

Z nepřetržité práce cirkulačního čerpadla vyplývá, že při tomto zvýšení ročního využití kotle K5 jsou sníženy výnosy i v případě, kdy se horkovod nepřehřívá, protože cirkulační čerpadlo je stále v provozu. Výnosy jsou nižší o cenu práce cirkulačního čerpadla a úměrně se snižují s potřebným sníženým odběrem tepla.

Na obrázku 13 je zobrazena závislost celkových výnosů teplárny na teoretické teplotě zpáteční větve horkovodu. Odpovídá to i využitelnému množství páry, které se vyrobí na kotli v případě kondenzace části páry. Ve výnosech jsou zahrnuty ziskové položky jako je prodej tepla a elektrické energie. Ztrátové položky jsou náklady na vlastní spotřebu teplárny, ztráta z nadbytečně vyrobeného tepla a náklady na práci cirkulačního čerpadla.



Obr. 13 Celkové výnosy za hodinu v závislosti na teoretické teplotě zpáteční větve horkovodu při kondenzaci části páry z protitlaku

#### 4.5 Zhodnocení

Tato metoda zvýšení ročního využití kotle K5 je založena na odvodu části páry z protitlaku TG4 do kondenzátoru odstavené turbíny AT6 Škoda Plzeň. Jedná se opět o práci kotle K5 na minimální výkon, 18 t/h, a následném odvodu dostatečného množství tepla, které odpovídá sníženému odběru. Teplo se odvádí ve formě páry do kondenzátoru, kde zkondenzuje a dále

pokračuje v okruhu teplárny. Tato pára se tedy nevyužije k ohřevu horké vody ve výměňkové stanici. Na první pohled to vypadá, že se jedná o ztrátový provoz, nicméně kotel K5 může být v provozu alespoň na minimální výkon delší dobu. Tato výroba je požadovaná oproti přejíždění na kotel K3. Je to hlavně z důvodu nižší účinnosti kotle K3 a omezených pracovních hodin za rok. Zde do výpočtu vstupují dvě hlavní položky. První je vyrobené teplo, kterého je na kotli K5 vyrobeno nadbytek a je zapotřebí nadbytečné teplo odvést. Na kotli K3 je vyrobeno množství tepla, které odpovídá požadovanému odběru. Druhá položka je vyrobená elektřina, kde na kotli K5 se vyrábí elektřina stále při minimálním výkonu, ale na kotli K3 se snižuje výkon, čili se snižuje i výroba elektřiny. Do výpočtů negativně zasahuje ještě práce cirkulačního čerpadla, které je v případě používání kondenzátoru a chladicího okruhu v provozu nepřetržitě, aby se chladicí voda dostatečně vychladila a v případě potřeby bylo možné kondenzaci použít i následující den. Tyto položky mají zásadní vliv na výslednou finanční stránku. Do výpočtů je zahrnuta vlastní spotřeba teplárny, která je za každých podmínek provozu teplárny.

Vyšší výnosy z výroby na kotli K5 a kondenzaci páry jsou závislé na chladicím okruhu, který je schopen pojmout pouze určité množství tepla a následně nebude dostačující chladicí účinek. Teplota chladicí vody má tedy velký vliv na tuto metodu zvýšení ročního využití kotle K5. Je to dáno vlastnostmi vody a páry, kdy v páře je velké množství tepelné energie, kterou je potřeba odvést chladicím okruhem. Předání méně tepla ve výměňkové stanici, které odpovídá snížení teploty zpáteční větve horkovodu. Tato pára je odvedena do kondenzátoru, kde zkondenzuje a předá teplo chladicí vodě. Ta se za daných podmínek (snížení teploty horkovodu o 1 °C) ohřeje přibližně o 3,3 °C. V objemu chladicí vody je velice pravděpodobné, že při delším používání této vody ke kondenzaci páry nastane, že se chladicí voda nevychladí dostatečně a teplota kondenzace se zvýší. Z toho vyplývá, že se tato metoda dá používat pouze určitou dobu, dokud nedojde k ohřátí chladicí vody nad přípustnou mez. Při provozu této metody je zapotřebí, aby chladicí voda cirkulovala i v době, kdy se toto chlazení nebude využívat, aby se teplota snížila. Následně je možné toto řešení chlazení horkovodu používat i další dny.

Výnosy z výroby páry na minimální výkon kotle K5 a následné kondenzaci páry jsou závislé na množství tepla, které je zapotřebí odvést, aby se ve výměňkové stanici předalo teplo odpovídající odběrům. Jsou zde stále příjmy z vyrobené elektřiny, protože se v tomto případě na kotli K5 vyrábí na minimální výkon. Vlastní spotřebu elektrické energie teplárna pokryje z výroby na turbogenerátoru, nadbytek elektřiny je rozveden do areálu ŽĐAS, a.s.. Tyto náklady jsou ovšem celoroční, které jsou i v případě výroby na kotli K3. Při tomto způsobu zvýšení ročního využití kotle K5 je přímou ztrátou teplo, které je zapotřebí odvést, aby teplo předané do horkovodu odpovídalo odběrům tepla a nedocházelo tak k přehřívání horkovodu. Další zápornou položkou v systému je cirkulační čerpadlo, které je v provozu nepřetržitě, aby byly zachovány vlastnosti vody pro chlazení.

Výsledky výpočtů jsou vztaženy k jedné hodině, nicméně náklady na práci cirkulačního čerpadla jsou celodenní, ale ztráty z vyrobeného tepla jsou pouze v případě sníženého odběru. Tato ztráta se zvyšující teplotou okolí se také zvyšuje a ve výsledku má velký vliv na výnosy teplárny.

## 5 Snížení minimálního výkonu kotle K5

### 5.1 Popis

Tento způsob zvýšení ročního využití kotle K5 spočívá ve snížení minimálního výkonu kotle K5 a následném provozu. Jelikož je minimální výkon kotle v případě nižšího odběru tepla stále vysoký, je nutnost dodat do výměňkové stanice méně tepla, které se předá do horké vody a následně zákazníkovi. Nižším výkonem kotle se vyrobí méně páry, která poté předává teplo ve výměňkové stanici. Zákazníkovi se tedy dodá požadované množství tepla a nedochází k přehřívání zpáteční větve horkovodu. Tímto způsobem zvýšení ročního využití kotle K5 se nevyrábí nadbytečné množství páry jako v předchozích případech, kde se muselo odvést teplo ze systému pomocí chladicího okruhu TG.

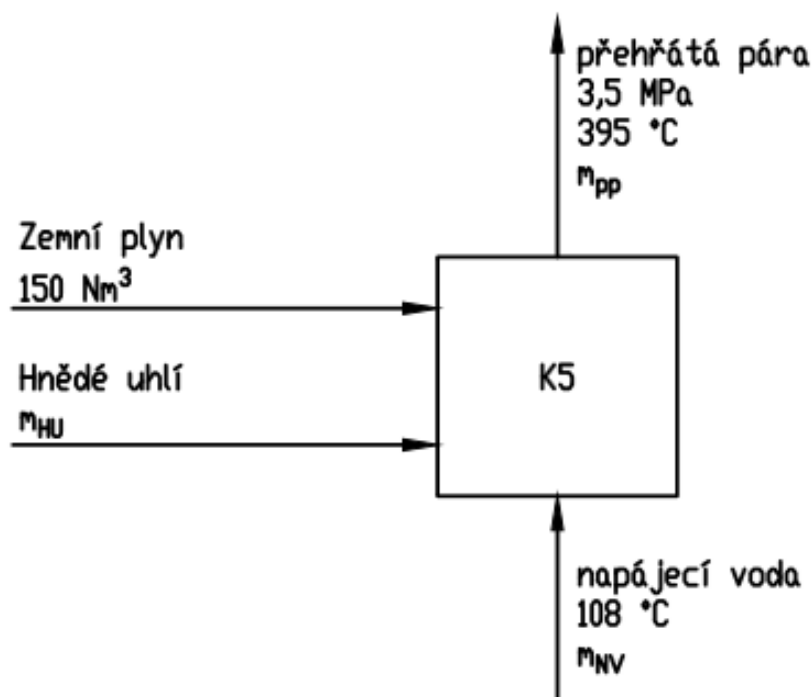
Za normálních podmínek, kdy se vyrábí na vyšší než minimální výkon, všechna pára proudí přes turbínu do výměňkové stanice, kde předá teplo, zkondenzuje a pokračuje do napájecích nádrží. V závislosti na odběru se zapojují výměníky ve výměňkové stanici, kde na nejvyšší výkon pojede nejvíce výměníků a se snižováním výkonu se snižuje i počet výměníků v provozu. Následně, za výměňkovou stanicí, kondenzát vzniklý z páry je dopravován do chladičů kondenzátu a voda koluje v systému.

V případě sníženého odběru, kdy se horkovod přehřívá, se na kotli vyrobí přesné množství páry, které je potřeba k zásobování teplem. Zde se tedy nejedná o nadbytečnou výrobu, vyrobí se méně páry i méně elektrické energie. Technicky je toho dosaženo tím, že se jeden plynový hořák zapálí na minimální průtok zemního plynu a dva ze čtyř uhelných hořáků se odstaví. V tomto případě je tedy v provozu jeden plynový hořák na konstantní výkon určený minimálním množstvím přivedeného zemního plynu a snižování výkonu je dosaženo snižováním otáček v mlýnu, který dodává uhlí do kotle.

### 5.2 Bilanční schéma

Na obrázku 14 jsou zobrazeny základní hodnoty v systému kotle K5. Jsou zde teploty a tlaky přehřáté páry, teplota napájecí vody. Dále je zde zobrazeno množství přehřáté páry a napájecí vody, které spolu souvisí. Množství vyrobené přehřáté páry snižujeme. Poslední dvě hodnoty je přívod paliva. První je zemní plyn, kterého je do kotle puštěno minimální množství, aby byl hořák v provozu ( $150 \text{ Nm}^3$ ). Poslední veličina znázorněna ve schématu je hnědé uhlí. Ve schématu je zobrazeno množství paliva, které se snižujícím parním výkonem snižuje.

Ve výpočtu je opět jako hlavní hodnota zvoleno množství tepla, o které je zapotřebí vyrobit méně. Velikost tohoto tepla je brána z výpočtu chlazení horkovodu pomocí výměníku tepla, aby bylo možné tyto metody srovnat a odpovídá to stejným hodnotám teplot na zpáteční větvi horkovodu. Výsledkem výpočtů je množství přehřáté páry, která je potřebná ke sníženým odběrům. Další hodnotou výpočtů bude množství hnědé uhlí, které se v případě snižování parního výkonu kotle musí snižovat. Nejdůležitějším výsledkem je finanční výpočet.



Obr. 14 Bilanční schéma při snižování výkonu

### 5.3 Výpočet sníženého výkonu kotle a elektrického výkonu

Ve výpočtu předaného tepla je bráno množství tepla, o které je zapotřebí snížit parní výkon kotle, aby se z důvodu snížených odběrů nepřehřívala zpáteční větev horkovodu. Velikost tohoto tepla je stejná jako v předchozích případech při stejných podmínkách. Je to z důvodu následného srovnání metod zvýšení ročního využití kotle K5. V tabulce 20 jsou zaznamenány hodnoty potřebné do výpočtů. Je zde zobrazen výkon, o který je potřeba snížit výkon kotle v MW a GJ/h. Dále zde jsou uvedeny výhřevnosti zemního plynu a hnědého uhlí. V posledním řádku je minimální množství zemního plynu, které se použije do hořáku.

Další hodnoty brané ve výpočtu byly vypočítány dříve. Jedná se o minimální vyrobené teplo na kotli K5 ( $Q_{K5}$ ), účinnost kotle K5 ( $\eta_{K5}$ ) a entalpie přehřáté páry ( $i_{ppK5}$ ) a entalpie napájecí vody ( $i_{NV}$ ).

Tab. 20 Zadané hodnoty pro výpočet tepla [1]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Potřebný chladicí výkon	$Q_1'$	2,4	MW
Potřebný chladicí výkon	$Q_1$	8,65	GJ/h
Výhřevnost zemního plynu	$Q_{iZP}^r$	34,7	MJ/m <sup>3</sup>
Výhřevnost hnědého uhlí	$Q_{iHU}^r$	15	MJ/kg
Množství zemního plynu	$V_{ZP}$	150	Nm <sup>3</sup>

Množství požadovaného tepla na zvýšenou teplotu zpáteční větve horkovodu

$$Q_{pož} = Q_{K5} - Q_1 = 49,65 - 8,65$$

$$Q_{pož} = 41 \text{ GJ/h}$$

Dodané teplo v palivu pro výrobu požadovaného množství tepla

$$Q_{dpož} = Q_{pož} \cdot \frac{100}{\eta_{K5}} = 41 \cdot \frac{100}{90}$$

$$Q_{dpož} = 45,56 \text{ GJ/h}$$

Dodané teplo ze zemního plynu

$$Q_{ZP} = V_{ZP} \cdot \frac{Q_{iZP}^r}{1000} = 150 \cdot \frac{34,7}{1000}$$

$$Q_{ZP} = 5,21 \text{ GJ/h}$$

Dodané teplo z hnědého uhlí

$$Q_{HU} = Q_{dpož} - Q_{ZP} = 45,56 - 5,21$$

$$Q_{HU} = 40,35 \text{ GJ/h}$$

Množství hnědého uhlí na výrobu tepla

$$m_{HU} = Q_{HU} \cdot \frac{1000}{Q_{iHU}^r} = 40,35 \cdot \frac{1000}{15}$$

$$m_{HU} = 2690 \text{ kg/h}$$

Podíl na výrobě tepla ze zemního plynu

$$x_{ZP} = \frac{Q_{ZP}}{Q_{dpož}} \cdot 100 = \frac{5,21}{45,56} \cdot 100$$

$$x_{ZP} = 11,43 \%$$

Pro výpočet množství páry, které odpovídá sníženému výkonu kotle, je zapotřebí znát entalpie přehřáté páry a napájecí vody. Tyto entalpie už byly určeny ve výpočtu stávajícího stavu.

Množství páry, o které se sníží výkon kotle K5

$$m_{p3} = \frac{Q_1 \cdot 1000}{i_{ppK5} - i_{NV}} = \frac{8,65 \cdot 1000}{3211,4 - 452,9}$$

$$m_{p3} = 3,14 \text{ t/h}$$

Velikost sníženého výkonu kotle K5

$$m_{p3} = m_p - m_{p3} = 18 - 3,14$$

$$m_{p3} = 14,86 \text{ t/h}$$

Elektrický výkon při sníženém výkonu kotle K5

$$P_{el3} = \frac{m_{P3}}{3,6} \cdot (i_{ppK5} - i_R) \cdot \frac{\eta_{TG4}}{100} = \frac{14,86}{3,6} \cdot (3211,4 - 2772,9) \cdot \frac{55}{100}$$

$$P_{el3} = 995,7 \text{ kW}$$

Tabulka 21 zobrazuje vstupní hodnoty do výpočtů a vypočtené hodnoty. V prvních 3 řádcích jsou zaznamenány vstupní hodnoty do výpočtů, které jsou stejné jako v obou předchozích metodách. První řádek odpovídá teoretické teplotě přehřáté zpáteční větve od 56 °C do 70 °C, druhý a třetí řádek obsahuje hodnoty v GJ/h a MW, o které je potřeba dodat méně tepla do horké vody, aby se zpáteční větev nepřehřívala.

Další řádky zobrazují výsledky výpočtů. Je zde množství požadovaného tepla, které je potřeba na výrobu při sníženém odběru, množství tepla, které je potřeba dodat v palivu odpovídající sníženému odběru. Dále je zde teplo dodané spalováním zemního plynu, které je dáno průtokem zemního plynu do plynového hořáku a je konstantní po celou dobu snižování výkonu kotle. Následuje množství tepla ze spalování hnědého uhlí, množství spalovaného hnědého uhlí a podíl výroby tepla ze zemního plynu. Následující dva řádky zobrazují množství páry, o které se sníží výkon kotle oproti minimálnímu a snížený parní výkon kotle. V posledním řádku je elektrický výkon, který je při sníženém výkonu kotle.

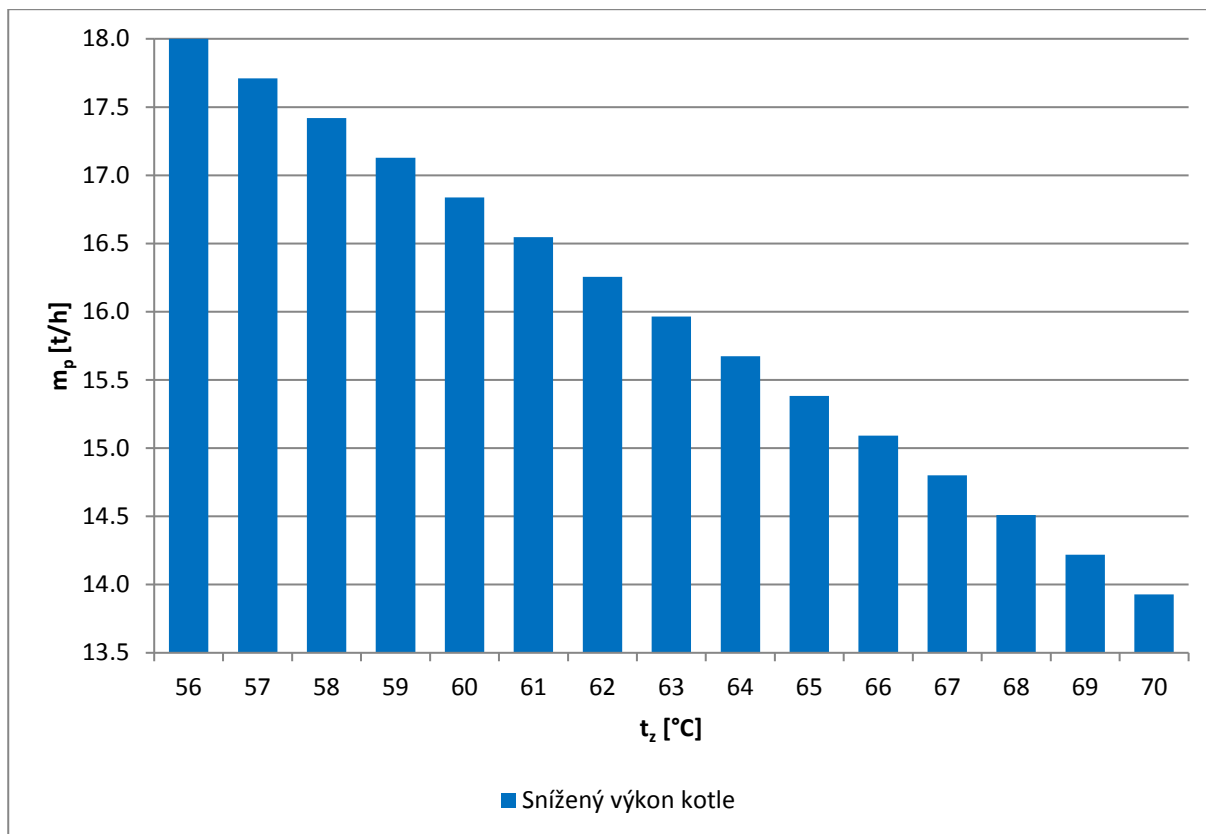
Tab. 21 Zadané a vypočtené hodnoty

t <sub>z</sub> [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
Q <sub>1</sub> [GJ/h]	0	1,6	3,21	4,81	6,42	8,02	9,63	11,23
Q <sub>1'</sub> [MW]	0	0,45	0,89	1,34	1,78	2,23	2,67	3,12
Q <sub>pož</sub> [GJ/h]	49,65	48,05	46,44	44,84	43,24	41,63	40,03	38,42
Q <sub>dpož</sub> [GJ/h]	55,17	53,39	51,6	49,82	48,04	46,26	44,47	42,69
Q <sub>ZP</sub> [GJ/h]	5,21							
Q <sub>HU</sub> [GJ/h]	49,97	48,18	46,4	44,62	42,83	41,05	39,27	37,49
m <sub>HU</sub> [kg/h]	3331	3212,2	3093,3	2974,5	2855,7	2736,8	2618	2499,1
x <sub>ZP</sub> [%]	9,43	9,75	10,09	10,45	10,83	11,25	11,7	12,19
m <sub>p3</sub> [t/h]	0	0,58	1,16	1,74	2,33	2,91	3,49	4,07
m <sub>P3</sub> [t/h]	18	17,42	16,84	16,26	15,67	15,09	14,51	13,93
P <sub>el3</sub> [kW]	1205,9	1166,9	1128	1089	1050	1011,1	972,1	933,1

Teplo dodané spalováním hnědého uhlí se v případě snižování výkonu zmenšuje a je toho docíleno omezováním otáček mlýna, který palivo do kotle přivádí. Tomu odpovídá množství hnědého uhlí, kterého se úměrně méně do kotle přivádí pro snižování parního výkonu. Následující položka, podíl výroby tepla ze zemního plynu, naopak stoupá, protože množství tepla dodaného spalováním zemního plynu je konstantní a teplo ze spalování hnědého uhlí klesá.

Snížením odběrů tepla u zákazníků tedy nastává snížení výroby tepla v teplárně na kotli K5. Při použití tohoto způsobu zvýšení ročního využití kotle K5 se v tomto kotli vyrábí přesné množství páry, které je potřeba k pokrytí odběrů tepla. To má za následek nižší elektrické výkony, které jsou závislé na množství páry, které proudí do turbíny. Tím pádem se snižují i zisky z prodeje elektrické energie.

Na obrázku 15 je zobrazena závislost vyrobené páry na kotli K5 na teplotě zpáteční větve horkovodu. Snížení teploty horkovodu odpovídá snížení výroby tepla o určité množství. Toto teplo je přepočítáno na množství páry, které se na kotli K5 vyrábí. Vychlazení horkovodu o 1 °C odpovídá nižší výrobě na kotli přibližně o 0,29 t/h. V grafu je zobrazena závislost pouze do snížení teploty zpáteční větve horkovodu ze 70 °C, což odpovídá určitému sníženému odběru. Nicméně tento způsob je možný používat při ještě nižším výkonu, protože zde není žádná závislost na teplotě chladicí vody jako v předchozích případech. V tomto případě jsou limitní minimální snížené výkony kotle, protože se vyrábí ze zemního plynu a jeho cena je vysoká ve srovnání s hnědým uhlím. Tím pádem budou vyšší náklady než při výrobě na kotli K3, na který se v případě sníženého odběru přejíždělo dříve.



Obr. 15 Závislost sníženého parního výkonu kotle K5 na teoretické teplotě zpáteční větve horkovodu

#### 5.4 Ekonomický výpočet

Výpočet je brán pro stejné hodnoty jako v předchozích dvou případech. Je tedy počítán s případnými teplotami zpáteční větve horkovodu od 56 °C do 70 °C a to odpovídá snížení výkonu kotle. Z výpočtů množství vyrobené páry a tepla je vidět, že výroba je přesně odpovídající sníženému odběru. Tyto hodnoty jsou z důvodu srovnání všech metod zvýšení ročního využití kotle K5. Při společné výrobě tepla ze zemního plynu a hnědého uhlí je zvýšená cena za GJ tepla, to má za následek, že úspora při snižování výkonu může být nižší než při jiném způsobu zabránění přehřívání horkovodu. Nicméně u jiných metod nastávají ztráty vlivem nadbytečné výroby. Při snižování výkonu kotle se vyrobí požadované množství tepla za vyšší cenu.

K výpočtu je zapotřebí ještě znát náklady na zemní plyn, které činí  $N_{zp} = 205 \text{ Kč/GJ}$ .



Náklady na vyrobené teplo z hnědého uhlí při sníženém výkonu kotle K5

$$N_{QHU3} = Q_{HU} \cdot N_{HU} = 40,35 \cdot 84$$

$$N_{QHU3} = 3389,4 \text{ Kč/h}$$

Náklady na vyrobené teplo ze zemního plynu při sníženém výkonu kotle K5

$$N_{QZP3} = Q_{ZP} \cdot N_{ZP} = 5,21 \cdot 205$$

$$N_{QZP3} = 1067 \text{ Kč/h}$$

Cena prodaného tepla při sníženém výkonu kotle K5

$$C_{Q3} = Q_{pož} \cdot V_Q = 41 \cdot 213$$

$$C_{Q3} = 8733 \text{ Kč/h}$$

Výnosy z vyrobeného tepla při sníženém výkonu kotle K5

$$V_{Q3} = C_{Q3} - (N_{QHU3} + N_{QZP3}) = 8733 - (3389,4 + 1067)$$

$$V_{Q3} = 4276,5 \text{ Kč/h}$$

Měrné náklady na palivo

$$N_{pal} = \frac{N_{QHU3} + N_{QZP3}}{Q_{pož}} = \frac{3389,4 + 1067}{41}$$

$$N_{pal} = 108,7 \text{ Kč/GJ}$$

Výnosy z vyrobené elektřiny při sníženém výkonu kotle K5

$$V_{el3} = P_{el3} \cdot V_{el} = 995,7 \cdot 1,8$$

$$V_{el3} = 1792,3 \text{ Kč/h}$$

Celkové výnosy při sníženém výkonu kotle K5

$$V_3 = V_{Q3} + V_{el3} - N_{tep} = 4276,5 + 1792,3 - 1401,9$$

$$V_3 = 4666,9 \text{ Kč/h}$$

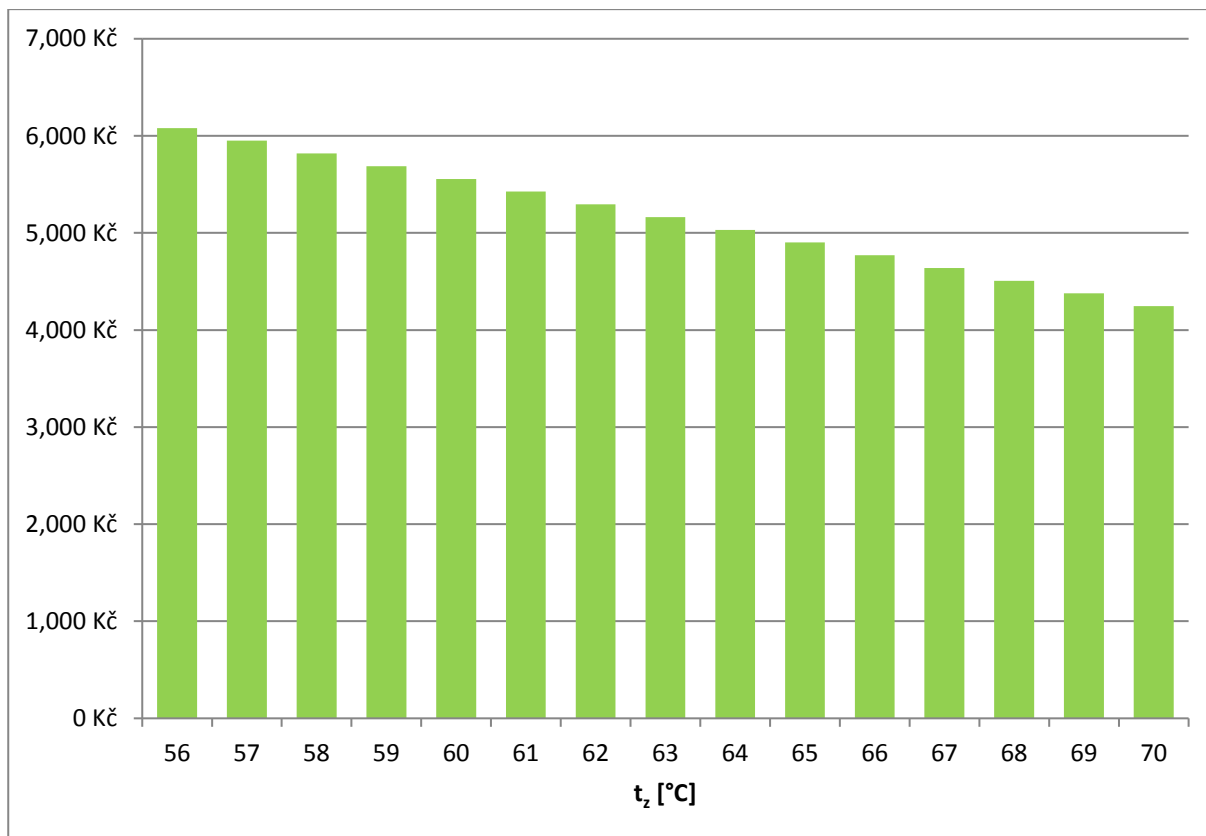
V tabulce 22 jsou zaznamenány hodnoty výpočtů snížení minimálního výkonu kotle K5 v závislosti na sníženém parním výkonu kotle. Jsou zde náklady na výrobu tepla z hnědého uhlí, které se v případě snižování výkonu také snižují a náklady na výrobu tepla ze zemního plynu, které mají stále stejnou velikost. Je to dáno tím, že plynový hořák je v provozu na konstantní výkon a snižuje se výkon mlýnu dopravujícího uhlí do hořáku. Následuje cena prodaného tepla a výnosy z prodaného tepla. Dále jsou měrné náklady na palivo, které jsou závislé na podílu paliv a úměrně se zvyšují se snižováním přívodu uhlí. Další řádek obsahuje výnosy z prodeje elektřiny. Výkon je závislý na množství páry, která proudí do turbíny.

Snižováním výkonu se snižuje i vyrobená elektřina a tedy i výnosy z prodeje elektrické energie. V posledním řádku jsou zaznamenány celkové výnosy v případě snižování minimálního výkonu kotle. Zisky zde tvoří prodej tepla a elektřiny, naopak jako záporná položka je brána spotřeba teplárny.

Tab. 22 Hodnoty ekonomického výpočtu snížení minimálního výkonu kotle K5 v závislosti na sníženém výkonu kotle

$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$m_{P3}$ [t/h]	18	17,42	16,84	16,26	15,67	15,09	14,51	13,93
$P_{el3}$ [kW]	1205,9	1166,9	1128	1089	1050	1011,1	972,1	933,1
$N_{QHU3}$ [Kč/h]	4197,1	4047,3	3897,6	3747,9	3598,1	3448,4	3298,7	3148,9
$N_{QZP3}$ [Kč/h]	1067							
$C_{Q3}$ [Kč/h]	10576,1	10234,4	9892,7	9551	9209,2	8867,5	8525,8	8184,1
$V_{Q3}$ [Kč/h]	5312	5120	4928	4736,1	4544,1	4352,1	4160,1	3968,1
$N_{pal}$ [Kč/GJ]	106	106,4	106,9	107,4	107,9	108,5	109,1	109,7
$V_{el3}$ [Kč/h]	2170,6	2100,4	2030,3	1960,2	1890,1	1819,9	1749,8	1679,7
$V_3$ [Kč/h]	6080,7	5818,6	5556,5	5294,3	5032,2	4770,1	4508	4245,9

Obrázek 16 zobrazuje závislost celkových výnosů teplárny na teoretické teplotě zpáteční větve. Odpovídá to i sníženému parnímu výkonu kotle K5. Výsledné výnosy jsou brány z prodeje tepla a elektřiny. Jako ztráta jsou zde brány pouze náklady na technologický provoz teplárny. Reálně se o ztrátu nejedná, protože se elektrická energie odebírá z vyrobené elektrické energie na turbogenerátoru. Tato elektrická energie je určena k vlastní spotřebě teplárny, čili se zákazníkovi prodá pouze určitá část.



Obr. 16 Celkové výnosy za hodinu při snížení minimálního výkonu kotle K5

## 5.5 Zhodnocení

V této metodě zvýšení ročního využití kotle K5 je kotel provozován na nižší výkon než je minimální. To má za následek, že se na kotli vyrobí určené množství páry, které odpovídá potřebnému sníženému odběru. Není tedy zapotřebí přejíždět na kotel K3. Následně je možné provozovat kotel K5 delší dobu i při snížených odběrech tepla. Množství tepla, o které se výkon kotle snižuje, je bráno z předchozích metod zvýšení ročního využití kotle K5, aby byla možnost všechny metody na závěr srovnat. V této metodě výpočtu výroba tepla přesně odpovídá sníženému odběru. Tedy se nejedná o nadbytečnou výrobu tepla jako v předchozích metodách, chlazení horkovodu pomocí výměníku tepla a kondenzace části páry v kondenzátoru. Ovšem výroba elektřiny je závislá na množství páry, která proudí přes turbínu do výměňkové stanice. Při sníženém výkonu je menší množství vyrobené páry, tedy i nižší výnosy z prodané elektřiny. Tyto položky, prodané teplo a elektřina, jsou hlavní do výpočtu ekonomické stránky této metody.

Při sníženém minimálním výkonu kotle K5 jsou výnosy závislé na množství tepla, které je vyráběno z levného hnědého uhlí a drahého zemního plynu současně. Následně je oproti stejné výrobě tepla na kotli K3 vyšší cena za vyrobené teplo, avšak není zapotřebí přejíždět na tento kotel, který má nižší účinnost, horší emisní hodnoty a omezený počet pracovních hodin za rok. Množství tepla vyrobeného ze zemního plynu je stále konstantní a je určeno minimálním množstvím zemního plynu, který se spaluje v plynovém hořáku, což se projevuje i ve výsledné ceně za vyrobené teplo. Naopak vyrobené teplo z hnědého uhlí se při snižování minimálního výkonu kotle K5 snižuje. Je to určeno otáčkami mlýnů, které dopravují uhelný prášek do kotle. Při snižování výkonu se snižují otáčky mlýnů a snižuje se tak množství přivedeného uhelného prášku. Druhým velice důležitým faktorem ve výnosech při výrobě tepla na snížený minimální výkon kotle K5 je prodej vyrobené elektřiny. Primárně vyrobená elektřina slouží k pokrytí vlastní spotřeby teplárny. Nadbytečná elektřina, která se nespotřebuje v teplárně je rozvedena po areálu ŽĐAS, a.s. a slouží ke spotřebě místních firem. Elektrická energie je velice závislá na množství páry, která expanduje v turbíně. Při snižování minimálního výkonu kotle K5 se snižuje výroba elektřiny a tedy i výnosy z prodeje elektrické energie. V případě této metody zvýšení ročního využití kotle K5 je množství tepla, které se předá ve výměňkové stanici odpovídající odběrům tepla.

Výsledky výpočtů jsou vztaženy k jedné hodině práce kotle na snížený výkon, protože odběry tepla jsou velice závislé na okolní teplotě. Výpočty na delší časový úsek jsou obtížné právě z důvodu změny odběrů v závislosti na okolní teplotě. Při snižování minimálního výkonu se postupně zvyšují náklady na vyrobené teplo za GJ, snižují se zisky z prodaného tepla a elektrické energie. V dnešní době je možné tuto metodu výroby tepla používat, protože je závislá na ceně zemního plynu, která je v současné době na poměrně přijatelné úrovni.

## **6 Provoz s malou kondenzační turbínou**

### **6.1 Popis**

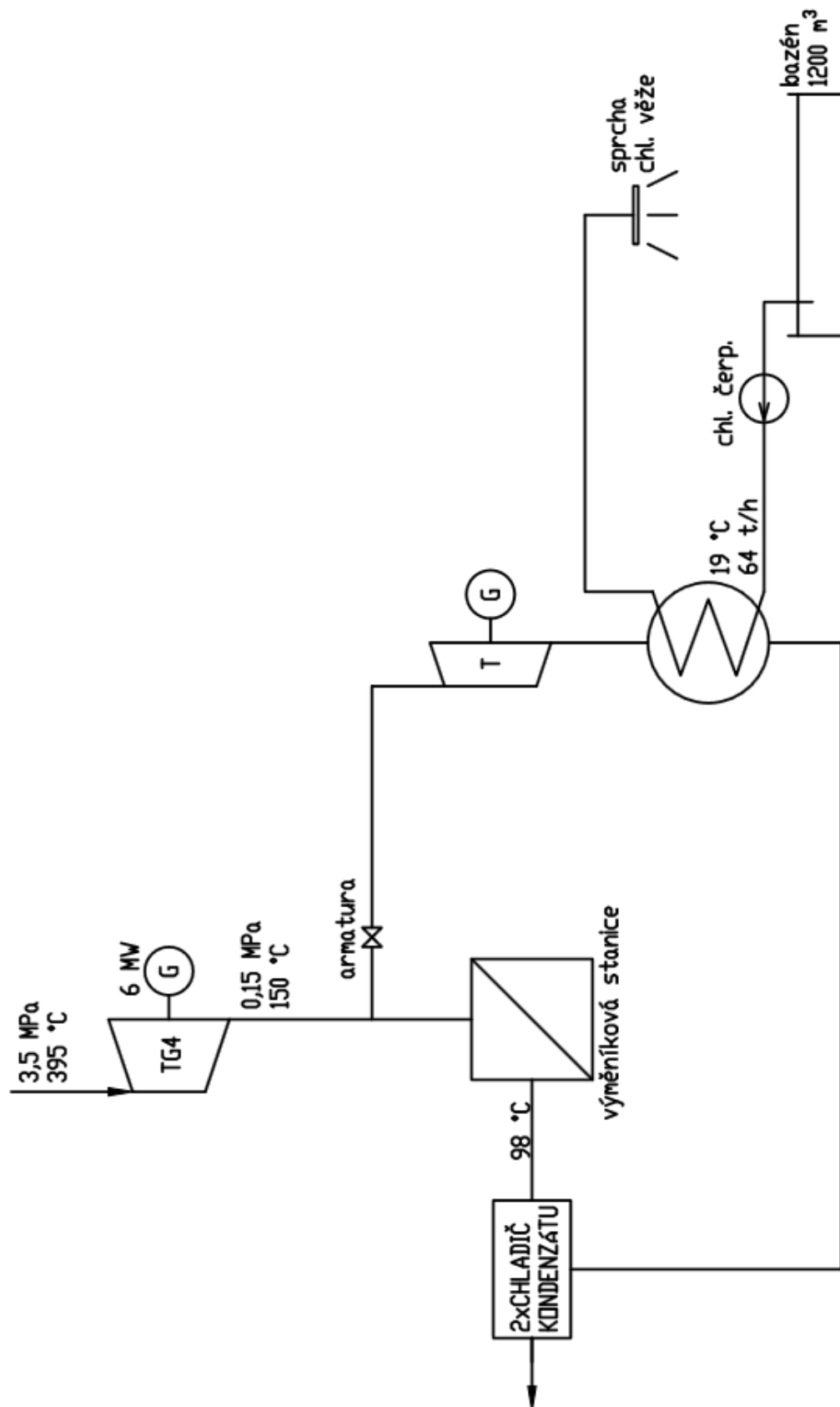
Zvýšení ročního využití kotle K5 lze také dosáhnout zapojením malé kondenzační turbíny za stávající protitlaký turbogenerátor TG4. Jedná se o provoz kotle na minimální parní výkon a následné odvedení určeného množství páry, o které je snížený odběr tepla. Pára se odebírá z protitlaku do malé kondenzační turbíny a přes kondenzátor pokračuje do chladiče kondenzátu, kde se smíchá s kondenzátem, který vznikl ve výměňkové stanici a pokračuje dále v okruhu kotle. Množství páry puštěné do výměňkové stanice musí odpovídat sníženým odběrům tepla. Nadbytek, který by měl za následek, že by se zpáteční větev horkovodu vlivem nižších odběrů přehřívala, je zaveden do malé kondenzační turbíny. Při použití této malé kondenzační turbíny se vyrábí elektrická energie v protitlakém turbogenerátoru TG4 z minimálního výkonu kotle a ještě navíc v malé kondenzační turbíně z nadbytečného množství páry.

Tato metoda zvýšení ročního využití kotle je obdobná jako v případě použití pouze kondenzátoru. Zde se ovšem jedná o ztrátu z páry, která není puštěná do výměňkové stanice, tak nepředá teplo horké vodě. Tato pára je využita k výrobě elektrické energie na malé kondenzační turbíně. V tomto případě se ještě vyrábí elektrická energie a výnosy jsou zvýšené o prodej této elektřiny. Při použití malé kondenzační turbíny jsou vysoké počáteční náklady. Jelikož se jedná o kondenzační turbínu, tak je v provozu i kondenzátor a chladičí okruh. Ten je stejný jako v předešlých případech zvýšení ročního využití kotle K5. Jelikož je zapotřebí za protitlakým turbogenerátorem TG4 rozdělit proud páry do výměňkové stanice a malé turbíny, je nutné, aby v potrubí byla příslušná armatura, která toto zajistí. Hlavní proud stále míří do výměňkové stanice a vedlejší proud je zaveden do nově nainstalované malé turbíny. V tomto případě je použitý chladičí okruh teplárny a po zkušenostech s jeho provozem v metodě s výměníkem a s kondenzátorem je pravděpodobné, že opět mohou nastat problémy s odvodem tepla při kondenzaci. Při použití této metody má případné zvyšování teploty chladičí vody za následek snižování výkonu kondenzační turbíny při stejném průtoku páry.

### **6.2 Bilanční schéma**

Jelikož je tato metoda zvýšení ročního využití kotle podobná jako použití kondenzátoru, je i bilanční schéma podobné. Pára proudí přes turbogenerátor TG4 do výměňkové stanice, kde předá teplo horké vodě, zkondenzuje a pokračuje přes chladič kondenzátu do napájecích nádrží a zpět do kotle. Je zde zapotřebí odvést určité množství páry, aby nevstupovala do výměňkové stanice a nepředávala nadbytek tepla, což má při sníženém odběru za následek přehřívání zpáteční větve horkovodu. Tato "nadbytečná" pára je zavedena do malé kondenzační turbíny a ještě je využita na výrobu elektrické energie. Rozdělení proudu páry na využitelnou ve výměňkové stanici a v kondenzační turbíně je docíleno pomocí škrtkového ventilu. Ten je ve schématu zobrazen jako armatura. Ke kondenzaci páry za malou turbínou je opět využitý chladičí okruh teplárny jako v případě chlazení pomocí výměníku a kondenzaci páry v kondenzátoru.

Hlavní hodnota do výpočtu je brána z první metody a jedná se o teplo, kterého je třeba předat méně ve výměňkové stanici. Výsledkem výpočtů je množství páry, která je odvedena do malé kondenzační turbíny a následný elektrický výkon. Tyto hodnoty mají největší vliv na výslednou finanční stránku této metody.



Obr. 17 Bilanční schéma při použití malé kondenzační turbíny

### 6.3 Výpočet elektrického výkonu turbíny a chladicího výkonu kondenzátoru

Vstupní hodnoty pro výpočet této metody zvýšení ročního využití kotle K5 jsou zaznamenány v tabulce 23. Je zde teplo, které je potřeba odvést mimo výměňkovou stanici, aby nedocházelo k přehřívání zpětné větve horkovodu. Velikost tohoto tepla je stejné jako v předchozích metodách. Dále množství páry, která je odvedená do malé kondenzační turbíny a množství využitelné páry pro předání tepla ve výměňkové stanici. Tyto hodnoty jsou stejné jako v případě použití kondenzátoru a jsou brány z výpočtu kondenzátoru. Dále zde jsou zaznamenány vlastnosti páry v protitlaku za turbogenerátorem TG4. Ještě zde jsou zapsány hodnoty chladicího okruhu jako je vstupní teplota, množství chladicí vody, měrná tepelná kapacita vody a teplota nedohřevu v kondenzátoru.

Tab. 23 Zadané hodnoty pro výpočet tepla [1]

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Předané teplo ve VS	$Q_1'$	2,4	MW
Předané teplo ve VS	$Q_1$	8,65	GJ/h
Množství odvedené páry	$m_{p4}$	3,66	t/h
Teoreticky snížený výkon	$m_{p4}$	14,34	t/h
Entalpie protitlaké páry	$i_R$	2772,9	kJ/kg
Entropie protitlaké páry	$s_R$	7,42	kJ/kgK
Teplota chladicí vody	$t_{chl}$	19	°C
Množství chladicí vody	$m_{ch}$	64	t/h
Měrná tepelná kapacita vody	$c$	4170	J/kgK
Teplota nedohřevu	$t_n$	4	°C

V tabulce je zaznamenána jedna hodnota, která nebyla dříve uvedena. Jedná se o entropii páry v protitlaku. Ta je stejně jako příslušná entalpie funkcí teploty a tlaku protitlaké páry za TG4.

Dále je zapotřebí znát vlastnosti kondenzátu vzniklého v kondenzátoru a entalpie za turbínou. Entalpie za turbínou je potřeba k výpočtu chladicího tepla, které je odvedeno v kondenzátoru a pro výpočet výkonu turbíny. Tyto hodnoty byly vypočteny iteračně podle následujícího výpočtu. Nejprve byla zvolena teplota chladicí vody podle výpočtu s kondenzátorem a další hodnoty dopočteny.

V případě použití malé kondenzační turbíny je množství tepla a páry odvedené mimo výměňkovou stanici stejné jako v případě použití kondenzátoru. Je zde počítán pouze chladicí výkon kondenzátoru, protože má vliv na teplotu kondenzátu a tedy i na výkon nové turbíny.

Teplota kondenzátu

$$t_k = t_{ch2} + t_n = 48,82 + 4$$

$$t_k = 52,82 \text{ °C}$$

Entalpie kondenzátu je funkcí teploty kondenzátu.

$$i_k = 221,1 \text{ kJ/kg}$$

Entalpie páry za malou turbínou je funkcí tlaku v kondenzátoru a entropie páry před turbínou

$$i_{2iz} = 2398,7 \text{ kJ/kg}$$

Chladicí výkon kondenzátoru za malou turbínou

$$Q_{ch} = \frac{m_{p4} \cdot (i_R - i_{2iz})}{1000} = \frac{3,66 \cdot (2772,9 - 2398,7)}{1000}$$

$$Q_{ch} = 7,98 \text{ GJ/h}$$

Teplota chladicí vody beze ztrát

$$t_{ch2} = t_{ch1} + \left( \frac{Q_{ch} \cdot 1000000}{c \cdot m_{ch}} \right) = 19 + \left( \frac{7,98 \cdot 1000000}{4180 \cdot 64} \right)$$

$$t_{ch2} = 48,82 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Rozdíl teplot chladicí vody

$$\Delta t_{ch} = t_{ch2} - t_{ch1} = 48,82 - 19$$

$$\Delta t_{ch} = 29,82 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Izoentropický výkon turbíny

$$P_{iz} = \frac{m_{p4}}{3,6} \cdot (i_R - i_{2iz}) = \frac{3,66}{3,6} \cdot (2772,9 - 2398,7)$$

$$P_{iz} = 380,8 \text{ kW}$$

Pro výpočet elektrického výkonu na svorkách je zapotřebí znát účinnost celého turbosoustrojí. Jedná se o termodinamickou vnitřní účinnost, účinnost generátoru, převodovky a mechanickou účinnost turbíny. Po odborné konzultaci je celková účinnost točivé redukce zvolena  $\eta_{TR} = 0,5$ .

Elektrický výkon na svorkách generátoru

$$P_{el} = P_{iz} \cdot \eta_{TR} = 1370,7 \cdot 0,5$$

$$P_{el} = 190,4 \text{ kW}$$

V tabulce 24 jsou zapsány vstupní a výstupní hodnoty výpočtů. Zadané hodnoty jsou stejné jako v metodě s kondenzátorem, protože se jedná o odvedení stejného množství tepla mino výměňikovou stanicí. V tomto případě se parametry páry využijí k expanzi na malé turbíně a vyrobí se tedy více elektřiny. První řádek odpovídá teplotě zpáteční větve horkovodu, která je zapotřebí snížit. Dále je množství tepla, o které je potřeba předat méně ve výměňikové stanicí v GJ/h a MW. Následuje množství páry, které se vede do malé turbíny a množství páry, která je zavedena do výměňikové stanice.

Další hodnoty jsou vypočítané iteračně pomocí ukázkového výpočtu. Jsou zde vlastnosti kondenzátu, teplota a entalpie, dále entalpie za turbínou při izoentropickém spádu, chladicí výkon odvedený v kondenzátoru. Dále je teplota výstupní chladicí vody z kondenzátoru a

rozdíl teplot chladicí vody na vstupu a výstupu z kondenzátoru. Na závěr je izoentropický výkon točivé redukce a svorkový výkon na generátoru točivé redukce.

Tab. 24 Zadané a vypočtené hodnoty

$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$Q_1$ [GJ/h]	0	1,6	3,21	4,81	6,42	8,02	9,63	11,23
$Q_1'$ [MW]	0	0,45	0,89	1,34	1,78	2,23	2,67	3,12
$m_{p4}$ [t/h]	0	0,68	1,36	2,04	2,72	3,4	4,07	4,75
$m_{p4}$ [t/h]	18	17,32	16,64	15,96	15,28	14,6	13,93	13,25
$t_k$ [°C]	23	28,37	33,81	39,31	44,91	50,57	56,3	62,1
$i_k$ [kJ/kg]	96,5	118,9	141,7	164,7	188,1	211,7	235,7	259,9
$i_{2iz}$ [kJ/kg]	2193	2232,4	2270	2306,8	2346	2383,5	2422	2460,2
$Q_{ch}$ [GJ/h]	0	1,44	2,89	4,36	5,86	7,37	8,91	10,46
$t_{ch2}$ [°C]	19	24,37	29,81	35,31	40,91	46,57	52,3	58,1
$\Delta t_{ch}$ [°C]	0	5,37	10,81	16,31	21,91	27,57	33,3	39,1
$P_{iz}$ [kW]	0	102	189,8	263,8	322,1	367,4	397,2	412,9
$P_{el}$ [kW]	0	51	94,9	131,9	161,1	183,7	198,6	206,4

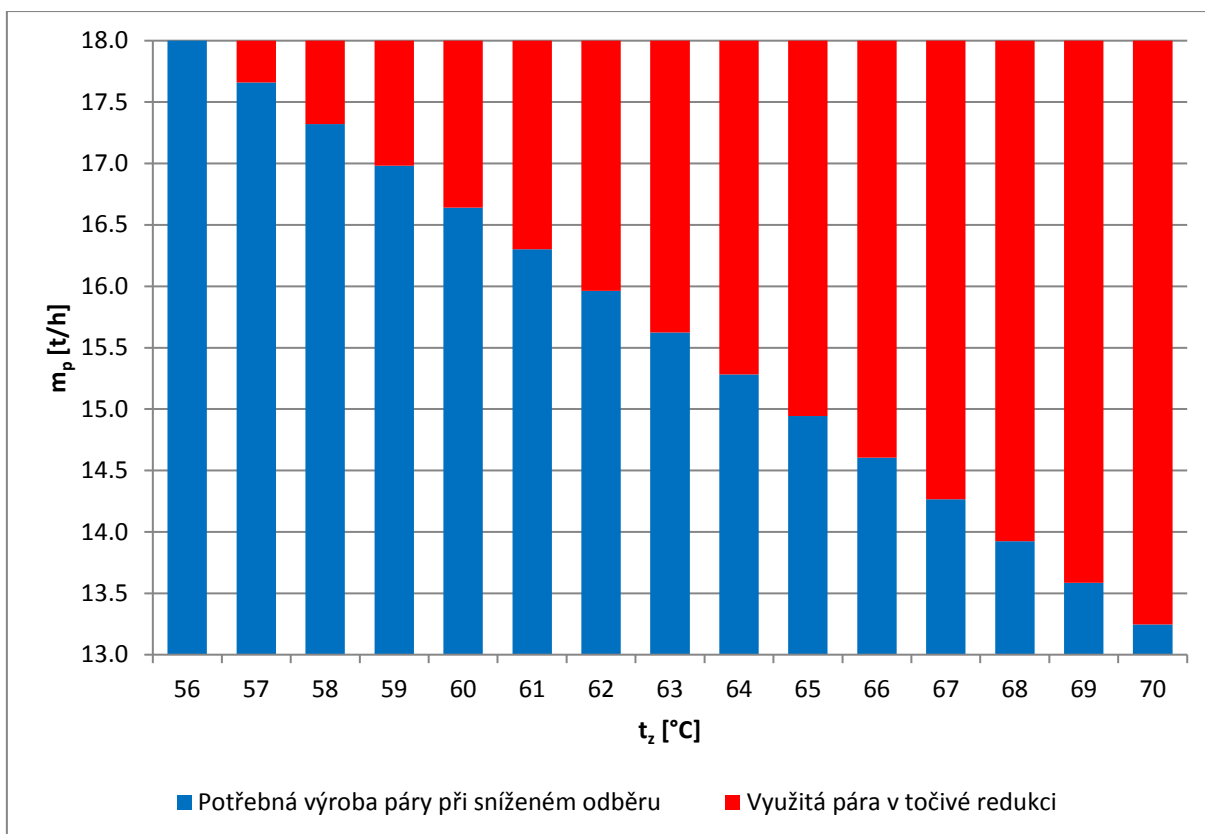
Při snižování odběru tepla pod minimální výrobu na kotli K5 tedy nedochází ke ztrátě při odvodu páry mino výměňkovou stanicí, nicméně pára nepředává teplo horké vodě, ale energie páry se ještě využije na malé kondenzační turbíně. Pro tuto turbínu je pozitivní vliv snižování odběru, protože do turbíny proudí více páry a vyrábí tak více elektřiny. Výpočty jsou opět provedeny do teoretické teploty přehřívání zpáteční větve 70 °C. Z výsledků zaznamenaných v tabulce 24 je vhodné zvolit točivou redukci o svorkovém elektrickém výkonu 200 kW. Tato redukce byla zvolena, protože při zvyšování průtoku páry se svorkový výkon nezvyšuje. Je to způsobeno ohřevem chladicí vody, která ovlivňuje tlak v kondenzátoru. Entalpický spád se při vyšším průtoku páry snižuje. Do volby této TR také zasahuje účinnost, která není konstantní ale kopíruje určitou křivku.

Výsledný výkon závisí na teplotě kondenzátu, která je určena vlastnostmi chladicího okruhu a kondenzátoru. Při nižších odběrech tepla se vede přes turbínu určité množství páry a ta dále předá teplo do chladicího okruhu. Zde mohou nastat různé změny výkonu turbíny, který je závislý na množství páry a entalpickém spádu. Když se množství páry zvýší, nastane větší odběr tepla v kondenzátoru a zvýší se parametry kondenzátu, tedy se snižuje entalpický spád.

Chladicí okruh je použitý stejný jako v případě chlazení horkovodu výměníkem nebo při použití kondenzátoru. Je tedy pravděpodobné, že se chladicí voda bude opět ohřívat a tím bude snižovat výkon turbíny při stejném průtoku páry. Vlastnosti chladicí vody jsou obdobné jako ve zmíněných metodách výpočtu, zde se ale odvádí menší množství tepla, nastává tedy lepší snížení teploty chladicí vody. Je to způsobeno nižšími parametry páry, která vstupuje do kondenzátoru, jelikož pára expandovala v turbíně.

Na obrázku 18 je zobrazena závislost množství páry na teoreticky zvyšující se teplotě zpáteční větve horkovodu. Modrou barvou je zobrazeno množství páry, které je zavedeno do výměňkové stanice a využívá se k ohřevu vody. Červenou barvou je zobrazeno množství páry, která ústí do malé kondenzační turbíny.





Obr. 18 Závislost vyrobené páry na teoretické teplotě zpáteční větve horkovodu

#### 6.4 Ekonomický výpočet

Jako v předchozích metodách zvýšení ročního využití kotle K5 je výpočet proveden do teoretické teploty zpáteční větve 70 °C. To určuje, jaké množství páry se vede mimo výměňkovou stanici na malou turbínu. Z výpočtu elektrického výkonu a chladicího výkonu v kondenzátoru je zřejmé, že je opět potřeba cirkulovat chladicí vodu nepřetržitě, aby se vychladila. Kotel K5 je v provozu na minimální výkon, čili bude ztráta z tepla, které se neprodá, ale instalací malé turbíny se využije energie páry pro výrobu elektrické energie. Zde nastávají vysoké investiční náklady na počátku realizace tohoto řešení. Ve výpočtu je zahrnuto prodané teplo, práce protitlaké turbíny TG4, vlastní spotřeba teplárny, práce cirkulačního čerpadla chladicího okruhu a práce malé kondenzační turbíny. Následující výpočty jsou provedeny pro jednu hodinu práce, z důvodu srovnání všech metod.

Jelikož se jedná o stejné množství páry, která je odvedena mimo výměňkovou stanici jako v případě použití kondenzátoru, bude i ztráta z nadbytečně vyrobeného tepla stejná.

$$Z_4 = Z_2 = Q_1 \cdot V_Q = 8,65 \cdot 213$$

$$Z_4 = 1843,1 \text{ Kč/h}$$

Práce cirkulačního čerpadla

$$N_{\text{č}} = P_{\text{č}} \cdot V_{\text{el}} = 80 \cdot 1,8$$

$$N_{\text{č}} = 144 \text{ Kč/h}$$

Výnosy z vyrobené elektřiny na malé turbíně

$$V_{elTR} = P_{el} \cdot V_{el} = 190,4 \cdot 1,8$$

$$V_{elTR} = 342,7 \text{ Kč/h}$$

Celkové výnosy při provozu s malou kondenzační turbínou

$$V_2 = V_{CK5} - Z_4 - N_{\dot{\epsilon}} + V_{elTR} = 6710,5 - 1843,1 - 144 + 342,7$$

$$V_2 = 5066,1 \text{ Kč/h}$$

Výsledky ekonomického výpočtu jsou uvedeny v tabulce 25. V prvních řádcích jsou uvedeny výsledky z výpočtu elektrického výkonu. Je zde teoretická teplota zpátečky, množství páry proudící do výměňkové stanice a elektrický výkon malé kondenzační turbíny. V následujících řádcích jsou ztráty či výnosy odpovídající teoretické teplotě zpátečky. Jsou zde ztráty z nadbytečně vyrobeného tepla, náklady na cirkulační čerpadlo chladicího okruhu, výnosy z výroby elektrické energie na malé turbíně a celkové výnosy teplárny při použití točivé redukce.

Tab. 25 Hodnoty ekonomického výpočtu při provozu malé kondenzační turbíny

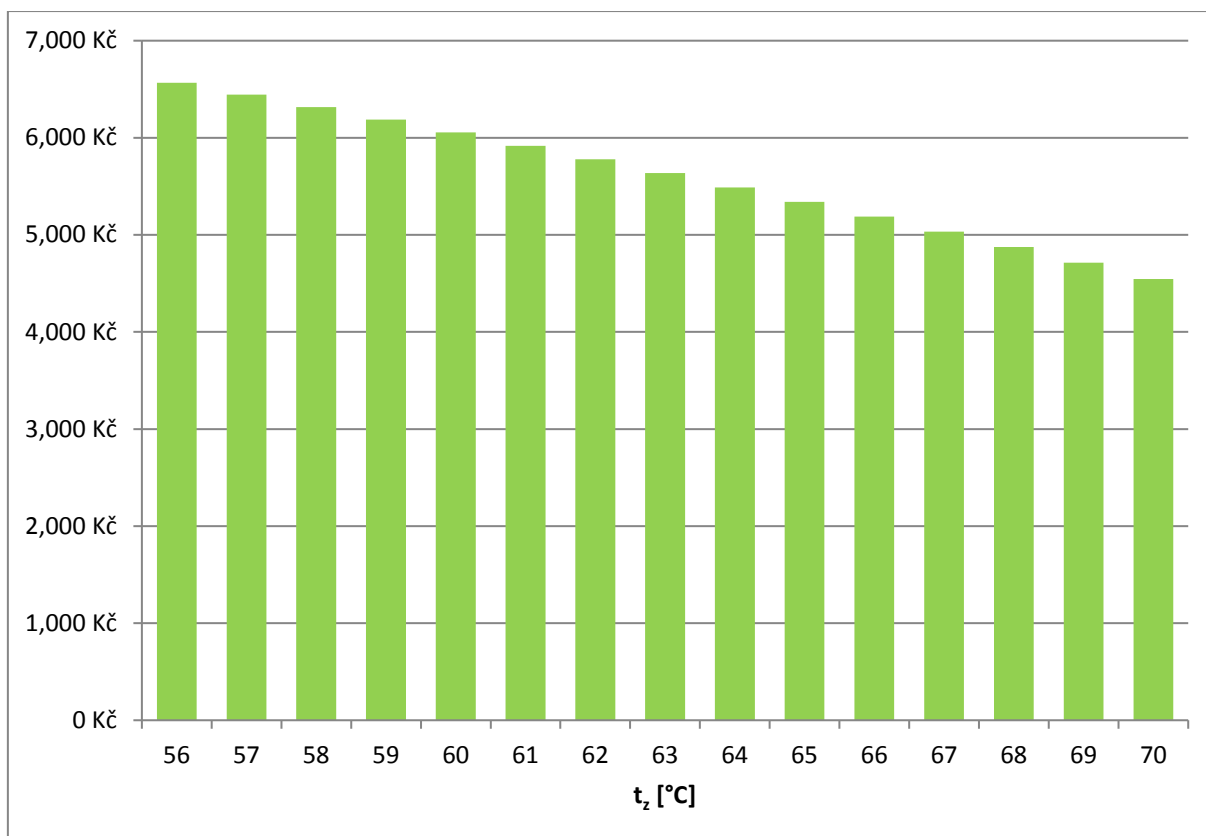
$t_z$ [°C]	56	58	60	62	64	66	68	70
$m_{p4}$ [t/h]	18	17,32	16,64	15,96	15,28	14,6	13,93	13,25
$P_{el}$ [kW]	0	51	94,9	131,9	161,1	183,7	198,6	206,4
$Z_4$ [Kč/h]	0	341,7	683,4	1025,1	1366,8	1708,6	2050,3	2392
$N_{\dot{\epsilon}}$ [Kč/h]	144							
$V_{elTR}$ [Kč/h]	0	91,8	170,8	237,4	289,9	330,6	357,5	371,6
$V_4$ [Kč/h]	6566,5	6316,5	6053,8	5778,7	5489,6	5188,5	4873,7	4546,1

Z výsledků je vidět, že zisk z prodeje elektrické energie vyrobené na točivé redukci pokryje část ztrát na výrobu nadbytečného množství páry. Jedná se ovšem o zlomek pokrytých ztrát.

Při práci točivé redukce je v provozu chladicí okruh a z výpočtů teplot chladicí vody je nutné, aby cirkulační čerpadlo chladicího okruhu bylo v nepřetržitém provozu, i když není snížen odběr tepla.

Celkové výnosy jsou tedy vypočteny z provozu kotle na minimální výkon. V turbogenerátoru TG4 expanduje konstantní množství páry, 18 t/h, vyrobená elektřina na TG4 je tedy konstantní. Záporná položka je vlastní spotřeba teplárny, která je napájena z vyrobené elektřiny na TG4. Další ztráty je práce čerpadla chladicího okruhu a ztráty z nadbytečně vyrobeného tepla. Jako kladná položka zde vystupuje vyrobená elektřina na malé turbíně, která ve výsledku ovlivňuje celkové výnosy teplárny.

Výsledné výnosy teplárny při použití točivé redukce jsou zobrazeny v grafu na obrázku 19. Jedná se o závislost výnosů na teoretické teplotě zpáteční větve. V grafu jsou zahrnuty výnosy z prodeje tepla, vlastní spotřeba teplárny, která je pokryta výrobou na turbogenerátoru TG4, výnosy z nadbytečně vyrobené elektřiny na TG4, práce čerpadla chladicího okruhu, ztráta z množství páry, která se nepodílí na výrobě tepla a výnosy z prodeje elektrické energie na točivé redukci.



Obr. 19 Celkové výnosy za hodinu při provozu malé kondenzační turbíny

### 6.5 Návratnost investice

Návrhem a výpočtem tepelných centrál se zabývá [6]. Tato kniha je podkladem pro následující výpočty návratnosti investice do malé kondenzační turbíny. Návratnost investice je počítána pouze teoreticky, protože bylo nutné zvolit důležité parametry výpočtu.

Základní úkol teplárny je dodávat teplo. Pára na kotli K5 se vyrábí na minimální výkon, nebo se přejíždí na kotel K3. Ten vyrobí přesné množství páry odpovídající sníženým odběrům tepla, ale za vyšší cenu. V případě provozu kotle K5 a použití točivé redukce se nadbytečná pára využije k výrobě elektrické energie. Kotel K5 je nutné udržet v provozu alespoň na minimální výkon, tj. 18t/h. Proto je návratnost investice do točivé redukce počítána pouze z prodeje vyrobené elektrické energie.

V tabulce 26 jsou zapsány vstupní hodnoty pro výpočet návratnosti investice. Svorkový výkon je brán z výpočtů elektrického výkonu, výnos z prodané elektřiny je stejný jako v případě ekonomických výpočtů uvedených výše. Investiční náklady na točivou redukci byly zvoleny po odborné konzultaci. Cena zahrnuje točivou redukci s asynchronním generátorem, projektové práce, parovody a odvodnění, montáž TR, rozvaděče, jističe, kabeláž a komplexní zkoušky a zaškolení obsluhy. Roční provozní náklady ve výpočtu nejsou uvedeny, protože točivá redukce je v provozu pouze určitou část roku a do výpočtu by se vnášela další nepřesnost. Roční provozní hodiny byly zvoleny na základě kapitoly 2.2. Výsledná doba ročního využití je vztažena na svorkový výkon. Jedná se o provoz točivé redukce v dubnu a říjnu po dobu 7 hodin denně a v části března a listopadu po dobu 4 hodin denně.

Tab. 26 Vstupní hodnoty pro výpočet návratnosti investice TR

Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Svorkový výkon	$P_{sv}$	200	kW
Výnos z prodané elektřiny	$V_{el}$	1,8	Kč/kWh
Investiční náklady	$N_i$	6	mil. Kč
Roční provozní hodiny	$\tau_r$	500	h

Roční výroba elektrické energie

$$E_r = P_{sv} \cdot \tau_r = 200 \cdot 500$$

$$E_r = 100000 \text{ kWh}$$

Roční výnosy za elektřinu

$$V_r = E_r \cdot V_{el} = 100000 \cdot 1,8$$

$$V_r = 180000 \text{ Kč}$$

Prostá doba splatnosti

$$T_0 = \frac{N_i}{V_r} = \frac{6000000}{180000}$$

$$T_0 = 33,3 \text{ let}$$

Jelikož je nejdůležitější hodnota ve výpočtu zvolena, je zde výpočet ukončen. Jedná se pouze o informativní výpočet. Zde nejsou zahrnuty provozní náklady na točivou redukci, které by zvyšovaly dobu návratnosti investice. Tyto náklady by byly opět voleny a docházelo by k chybě výpočtu, proto je zvolena metoda výpočtu bez provozních nákladů.

Návratnost 33,3 let pro točivou redukci o výkonu 200 kW, je velmi dlouhá doba a nevyplátí se do teplárny točivou redukci instalovat. Je počítáno s prací točivé redukce pouze v přechodném období, kdy by byla v provozu. Hodnoty byly brány z roku 2016. Vzhledem k ceně točivé redukce a vyrobené elektřině, investice se prakticky nevrátí. Zde ještě nastává otázka, při práci této točivé redukce, zda bude chladicí voda vychlazena dostatečně, protože má vliv na entalpický spád na TR. Hlavní faktor návratnosti investice je doba ročního provozu.

## 6.6 Zhodnocení

Zvýšení ročního využití kotle K5 pomocí malé turbíny je založeno na odvodu určitého množství páry z protitlaku do malé kondenzační turbíny. Ta v turbíně expanduje a je využita pro výrobu elektrické energie. Množství páry zavedené do turbíny odpovídá rozdílu sníženého odběru a minimálního výkonu kotle K5. Zde se tedy nevyužije všechna pára k ohřevu vody pro dodávku tepla. V součtu se ovšem množství vyrobené páry na kotli využije pro výrobu elektřiny na turbogenerátoru TG4 a dále se rozdělí v potřebném poměru do výměňkové stanice, kde předá teplo a do turbíny, kde slouží k výrobě elektřiny. Nejedná se tedy o ztrátový provoz. Zde je oproti použití chladicího výměníku a kondenzátoru velice důležitá veličina a to výnosy z výroby elektrické energie na točivé redukci.

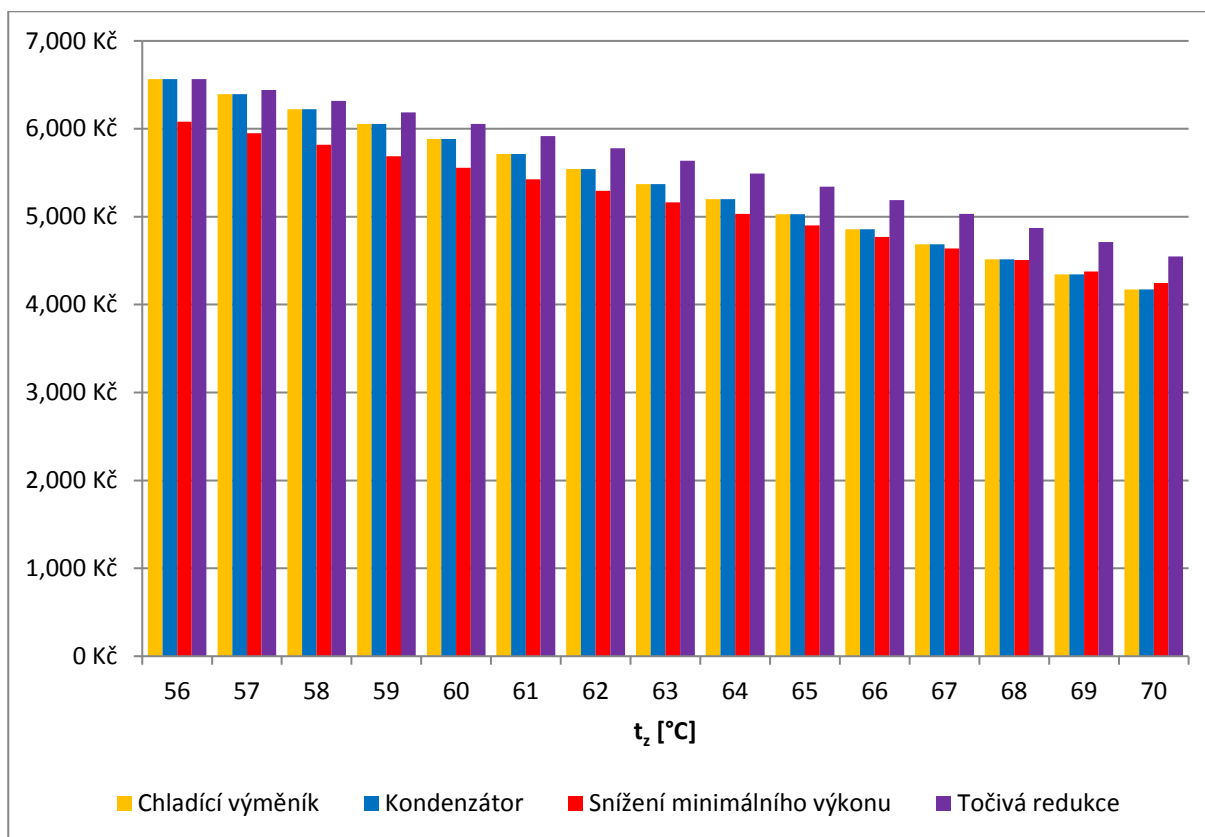
Výnosy při použití točivé redukce jsou závislé na množství páry, která expanduje v TR a entalpiích před a za TR. S lineárním zvyšováním průtoku páry do TR se snižuje entalpický spád, protože se otepluje chladicí voda. Další vliv má také účinnost točivé redukce, která není konstantní, ale má křivku účinnosti. Tedy při ohřevu chladicí vody se zvyšuje teplota kondenzátu a snižuje se tak entalpický spád a následně výkon točivé redukce. Zde nastává obdobný problém s ohřevem chladicí vody jako při použití chladicího výměníku a kondenzátoru. Chladicí voda se tedy ohřívá poměrně rychle a není dostatečně vychlazená. Při použití točivé redukce to má vliv na výsledný elektrický výkon.

Výnosy při provozu s malou kondenzační turbínou jsou závislé na množství prodaného tepla, množství vyrobené elektrické energie a nákladech na práci teplárny. Prodaná elektrická energie souvisí s prodaným teplem. Se snižováním odběrů tepla se zvyšuje výroba elektrické energie. Zápornou položkou při použití točivé redukce je opět čerpadlo chladicího okruhu, které je v neustálém provozu, aby docházelo k vychlazení chladicí vody.

Výsledky výpočtů provozu točivé redukce jednu hodinu jsou optimistické, jelikož se zde odvedené teplo ve formě páry transformuje na elektrickou energii. V celkovém výsledku s investičními náklady je ovšem použití točivé redukce ziskové až po velice dlouhé době. Zásadní vliv na výnosy má počet provozních hodin za rok. Výpočet je proveden pouze s přechodným obdobím, opírá se o hodnoty v kapitole 2.2 a počet hodin byl zvolen. Se zvyšujícími se teplotami v zimě se dá očekávat, že se bude zvyšovat teplota i v přechodném a letním období. Poté bude točivá redukce v provozu obdobný počet provozních hodin. Jelikož v zimním období se všechna pára využije k výrobě tepla, lze předpokládat, že točivá redukce bude mimo provoz. Obdobné to je v letním období, kdy se pára vyrábí na kotli K3, který se provozuje s turbogenerátorem TG3 a vyrobí přesné množství páry odpovídající odběrům. Zásadní vliv na výnosy točivé redukce má počet provozních hodin za rok. Tato veličina je závislá na venkovní teplotě.

## 7 Srovnání metod zvýšení ročního využití kotle K5

Na obrázku 20 je srovnání metod ekonomického výpočtu zvýšení ročního využití kotle K5. Tyto hodnoty jsou vypočteny na jednu hodinu provozu kotle při přehřívání zpáteční větve horkovodu. Na jednu hodinu proto, že provoz je závislý na teplotě okolí a ta se může velice měnit.



Obr. 20 Srovnání metod ekonomického výpočtu zvýšení ročního využití kotle K5

Při tomto srovnání provozu jedné hodiny kotle K5 nejlépe vychází metoda s použitím točivé redukce. Zde do výsledků vstupuje mnoho proměnných veličin. Hlavní je návratnost investice, která je při výkonu točivé redukce o výkonu 200 kW prakticky nulová. Točivá redukce by tedy začala vydělávat po mnoha letech. Další důležitá hodnota je chladicí výkon předaný v kondenzátoru. Výkon točivé redukce je závislý na tlaku v kondenzátoru. Tento tlak se ovšem zvyšuje s rostoucí teplotou chladicí vody a snižuje se tak entalpický spád.

Jako další jsou na stejných hodnotách zisku provoz s chladicím výměníkem nebo s kondenzátorem. Tyto dvě metody mají stejné výnosy, protože je zapotřebí odvést stejné množství tepla mimo horkovod. Buď zavedením páry mimo výměníkovou stanici v případě kondenzátoru, nebo přímé zavedení vody ze zpáteční větve horkovodu do chladicího výměníku. Voda v chladicím okruhu se velmi ohřeje a je nutné aby v případě použití čerpadla, se kterým je počítáno, voda cirkulovala nepřetržitě. To má za následek snižování výnosů i při provozu kotle K5 na vyšší než minimální výkon. Tomuto se dá zabránit použitím výkonnějšího čerpadla. Při provozu tohoto čerpadla jsou vyšší náklady na provoz, ale chladicí voda se tolik neohřívá, je tedy možné tyto dvě metody používat delší dobu. Zde je také možnost při dostatečném vychlazení chladicí vody čerpadlo na noc vypnout.

Nejnevýhodnější metodou výpočtu se jeví snižování minimálního výkonu kotle K5. Při tomto provozu kotle vyrábí přesné množství páry, které odpovídá sníženým odběrům. Pára je ovšem vyráběna ze společného spalování hnědého uhlí a zemního plynu. Zde je určeno množství zemního plynu, který je spalován a dále se snižuje množství přivedeného hnědého uhlí do kotle. Při snižování minimálního výkonu kotle je určitá mez, tj. snížený výkon kotle, která je výhodnější než použití chladicího výměníku nebo kondenzátoru. Při tomto způsobu zvýšení ročního využití kotle K5 se vyrobí méně tepla za vyšší cenu. Nejsou zde ovšem žádné náklady na čerpadlo chladicího okruhu, které jsou ve všech ostatních metodách.

Ze srovnání všech metod zvýšení ročního využití kotle K5 tedy vyplývá, že pořizování točivé redukce se nevyplatí hlavně kvůli vysokým investičním nákladům a velice pomalé splatnosti investice. Při použití chladicího výměníku a kondenzátoru jsou výnosy snižené o ztráty z nadbytečně vyrobené páry a práci čerpadla chladicího okruhu. Nicméně se jedná o velice podobné metody, kde se nadbytečné teplo vyvede do chladicího okruhu. Při použití těchto metod je výhodnější provoz s chladicím výměníkem, protože je chladicí výkon na potřebné odebrání tepla ze systému nižší než v případě použití kondenzátoru. Pro dlouhodobý provoz jedné z těchto variant by bylo vhodné použití výkonnějšího čerpadla v chladicím okruhu. Snižování minimálního výkonu kotle se jeví jako nejhorší varianta, ale ve srovnání s točivou redukcí je vhodnější. Při srovnání s chladicím výměníkem a kondenzátorem je tato metoda výhodná až od určitého sníženého odběru. Nebo také při dlouhodobém provozu, protože zde není v provozu chladicí okruh a tedy příslušné čerpadlo. Na snižování minimálního výkonu má zásadní vliv cena zemního plynu, která je téměř  $2,5\times$  vyšší než je cena hnědého uhlí, ze kterého se pára za normálních podmínek vyrábí.

## 8 Experimentální snížení minimálního výkonu kotle K5

V příloze 1 je zaznamenán průběh experimentálního snížení minimálního výkonu kotle K5. Pro srovnání je zde zobrazena i tabulka výroby tepla na kotli K3. Tento experiment byl proveden na přelomu dubna a května 2016.

V první tabulce jsou hodnoty při provozu kotle K5 v závislosti na čase a venkovní teplotě. Nejprve je kotel v normálním provozu. Od 9. hodiny se výkon kotle snižuje v závislosti na venkovní teplotě. Kotel K5 je v provozu na snížený výkon do 17. hodiny a dále pracuje v normálním provozu. Snižování výkonu je provedeno spalováním zemního plynu a následným snižováním množství spalovaného uhlí. Je zde zobrazeno množství páry, při sníženém výkonu, které odpovídá sníženým odběrům tepla. Tomu odpovídá i vyrobené teplo. Množství spalovaného zemního plynu se pohybuje od 300 m<sup>3</sup>/h. Tomuto množství zemního plynu odpovídá i množství vyrobeného tepla ze ZP a podíl výroby tepla ze ZP. Následuje cena spáleného hnědého uhlí a zemního plynu. Z tohoto jsou vypočteny měrné náklady na vyrobený GJ tepla. Sníženému množství páry odpovídá i vyrobená elektřina na turbogenerátoru TG4. V posledním sloupci je venkovní teplota, která určuje snížené odběry a tedy snižování výkonu kotle.

Druhá tabulka zobrazuje výrobu tepla na kotli K3. Je zde množství vyrobené páry, tomu odpovídající množství vyrobeného tepla. Dále zde je cena spáleného hnědého uhlí a měrné náklady na vyrobený GJ tepla. V posledních dvou sloupcích je stejně jako u kotle K5 vyrobená elektřina a venkovní teplota.

Srovnáním výroby tepla na obou kotlích podle experimentu vychází lépe provoz kotle K3. Je to z důvodu nižších měrných nákladů na prodaný GJ tepla. Vyrobená elektřina odpovídá množství vyrobené páry. Zde do srovnání vstupuje cena hnědého uhlí i zemního plynu. Při výrobě tepla na kotli K3 je spalováno pouze hnědé uhlí, které stojí 85 Kč/GJ a měrné náklady na vyrobený GJ tepla jsou 121 Kč/GJ. To odpovídá poměrně nízké účinnosti kotle K3. Výroba na snížený minimální výkon kotle K5 oproti výrobě na kotli K3 vychází dražší. Je to způsobeno cenou zemního plynu, který zvyšuje měrné náklady na vyrobený GJ. Za společného spalování minimálního množství zemního plynu (300 m<sup>3</sup>/h) a hnědého uhlí se měrné náklady na vyrobený GJ pohybují od 121 Kč/GJ výše.

Při srovnání vypočteného sníženého minimálního výkonu (kapitola 5) a experimentu jsou některé hodnoty rozdílné. Jako hlavní rozdílná hodnota je minimální množství zemního plynu, který je spalován. Toto množství je poloviční, tj. 150 m<sup>3</sup>/h. Dále je ve výpočtu vyšší cena zemního plynu. Tyto dvě hodnoty mají zásadní vliv na výsledné měrné náklady na vyrobený GJ. Velikost měrných nákladů na vyrobený GJ roste se snižováním výkonu, tj. snižováním odběru tepla. Cena za GJ se při snižování výkonu pohybuje od 106 Kč/GJ při parním výkonu 18 t/h. Dále se náklady zvyšují. Tyto náklady jsou poměrně nízké a vyplatí se snižovat minimální výkon kotle K5 místo provozu kotle K3.



## **Závěr**

Cílem diplomové práce bylo zvýšit roční využití parního práškového kotle ve ŽĎAS, a.s.. Práce je zaměřena na provoz kotle K5 v přechodném období, kdy se snižují odběry tepla a minimální výkon tohoto kotle je nadbytečný. Práce byla rozdělena do více kapitol. První kapitola popisuje teplárnu ŽĎAS, a.s., dále pokračuje popis stávajícího stavu. Následují čtyři kapitoly s jednotlivými metodami zvýšení ročního využití kotle K5. Na závěr práce jsou metody srovnány a je zde popsáno experimentální snížení minimálního výkonu.

Na začátku práce je rešeršní část pro seznámení s teplárnou ŽĎAS, a.s. a jejím vybavením. Druhá kapitola popisuje stávající stav, kdy výroba na minimální výkon na kotli K5 v přechodném období je stále vysoká a dochází tak k přehřívání zpáteční větve horkovodu. Je zde obecný popis nynějšího stavu. Poté je popsáno roční využití kotle K5 v roce 2016, kde je v grafu jasně vidět problematické přechodné období. Dále je zde výpočet výnosů při práci kotle K5 na minimální výkon.

Následují čtyři nejdůležitější kapitoly práce. Zde jsou popsány a vypočteny jednotlivé metody zvýšení ročního využití kotle K5. Tyto čtyři kapitoly obsahují obecný popis metod, bilanční schéma, tepelný a ekonomický výpočet a zhodnocení každé metody na závěr. Nejprve je metoda s použitím výměníku tepla, který za pomoci chladicího okruhu turbogenerátoru chladí přehřívanou zpáteční větev horkovodu. Dále je metoda s použitím kondenzátoru, do kterého je zavedeno určité množství páry, aby nedocházelo k přehřívání horkovodu a stejného chladicího okruhu turbogenerátoru. V páté kapitole je popsána a vypočtena metoda se snižováním minimálního výkonu kotle K5. Šestá kapitola popisuje provoz s malou kondenzační turbínou. Nejdůležitějším výstupem z těchto čtyř kapitol jsou výnosy teplárny při použití jednotlivých metod.

Sedmá kapitola srovnává předchozí čtyři metody zvýšení ročního využití kotle K5. Jako nejvhodnější metody z ekonomického i technického hlediska vyšly dvě. Která je vhodná, závisí na době snížených odběrů tepla, tedy na okolní teplotě. Při krátkých snížených odběrech, na začátku a na konci zimy, je vhodné použít výměník tepla ke chlazení zpáteční větve horkovodu. Zde je závislost na vlastnostech chladicí vody, která se při delším používání ohřívá a chladicí účinek se snižuje. Naopak, když jsou snížené odběry dlouhodobější, vyšší okolní teploty, je vhodné snižování minimálního výkonu kotle K5. Při nynějších cenách zemního plynu se snižování minimálního výkonu vyplatí, ale v případě vzrůstu ceny zemního plynu tato metoda již není vhodná. V případě zvýšení ceny zemního plynu nad přípustnou mez je vhodné instalovat výkonnější čerpadlo a využívat chlazení zpáteční větve horkovodu pomocí výměníku tepla. Metoda s použitím kondenzace páry z protitlaku TG4 je obdobná jako použití výměníku tepla pro chlazení zpáteční větve horkovodu, ale jsou zde vyšší chladicí výkony. Poslední metoda s provozem točivé redukce je vzhledem k návratnosti investice nepoužitelná.

Na závěr je popsáno experimentální snížení minimálního výkonu kotle K5 a srovnáno s vypočtenými hodnotami. Vypočtené hodnoty v kapitole 5 jsou aktuálnější, ale po přepočtu na stejné hodnoty odpovídají experimentu.

## Zdroje

- [1] Firemní literatura ŽĐAS, a.s.
- [2] Tepelné hospodářství SATT, a.s.. *SATT, a.s. - internet, televize, telefon a energie* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.satt.cz/teplo>
- [3] Portál ČHMÚ : Historická data : Počasí : Územní teploty. *Portál ČHMÚ* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#>
- [4] Tepelné vlastnosti vody při tlaku nasycení. *TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/7-tepelne-vlastnosti-vody-pri-tlaku-nasyceni>
- [5] FIEDLER, J. *Parní turbíny: návrh a výpočet*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 66 s. ISBN 80-214-2777-9.
- [6] KRBEK, J., B. POLESNÝ a J. FIEDLER. *Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet*. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. ISBN 80-214-1334-4.
- [7] KADRNOŽKA, J. *Tepelné turbíny a turbokompresory: základy teorie a výpočtů*. Brno: CERM, 2004, 208 s. ISBN 80-720-4346-3.
- [8] ŠKOPEK, J. *Parní turbína: Tepelný a pevnostní výpočet*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007, 170 s., 54 s. příl. ISBN 978-80-7043-256-3.

### **Seznam použitých symbolů a zkratek**

CZT	Centrální zásobování teplem
DN	Jmenovitý rozměr potrubí
G	Generátor
HOČ	Hlavní olejové čerpadlo
HU	Hnědé uhlí
K	Kotel (3,5,7,8)
KČ	Kondenzátní čerpadlo
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
NČ	Napájecí čerpadlo
NN	Napájecí nádrž
RS	Redukční stanice
ŠO	Špičkový ohřívák
TG	Turbogenerátor (3, 4)
TR	Točivá redukce
TUV	Teplá užitková voda
VS	Výměňíková stanice
ZO	Základní ohřívák
ZP	Zemní plyn

Pozn.: Významy jednotlivých symbolů a veličin jsou uvedeny přímo v textu

### **Seznam příloh**

Příloha č.1: Experimentální snížení minimálního výkonu kotle K5 [1]

## **Přílohy**

### Příloha č.1: Experimentální snížení minimálního výkonu kotle K5 [1]

MIN. VÝKON K5 (1 mlýn + ZP ) od 9<sup>00</sup> do 17<sup>00</sup> 29.4 2016.

den	hod	výr. páry tun	výr. tepla GJ	sp. ZP tis. Nm3	výr. z ZP GJ	podíl výr. z ZP %	sp. HU Kč	sp. ZP Kč	měř. náklady paliva v Kč / GJ výr.	výr. TG4 MWh	T venk. °C
K5 29.4 2016	6-7	47,63	133,3	0	0	0	12871	0	97	5,518	-0,5
	7-8	28,13	77,9	0	0	0	7522	0	97	2,891	0,9
	8-9	19,98	54,5	0,04	1,25	2	5142	258	99	1,752	4,2
	9-10	13,14	36	0,31	9,66	27	2543	1997	126	0,701	6,9
	10-11	16,36	44,8	0,32	9,97	22	3363	2061	121	0,6	8
	11-12	17,33	47,6	0,38	11,85	25	3452	2448	124	0,846	9,1
	12-13	12,34	33,6	0,43	13,4	40	1951	2770	141	0,524	10
	13-14	11,2	30,4	0,43	13,4	44	1642	2770	145	0,568	11,1
	14-15	12,08	32,8	0,41	12,78	39	1933	2641	139	0,694	10,9
	15-16	12,77	34,8	0,43	13,4	39	2066	2770	139	0,848	11,2
16-17	13,97	38,3	0,41	12,78	33	2464	2641	133	1,054	11,5	
17-18	23,56	65,6	0	0	0	6334	0	97	1,892	12,1	
19-20	23,25	64,9	0	0	0	6267	0	97	1,934	11,9	
úč. K5 88 %											
K3 2.5 2016	10-11	10,7	30,4	0	0	0	3690	0	121	0,62	12,2
	11-12	10,5	30,2	0	0	0	3666	0	121	0,521	13,3
	12-13	12,4	35,4	0	0	0	4297	0	121	0,548	14,2
	13-14	11	31,9	0	0	0	3872	0	121	0,567	15,2
	14-15	11,4	32,7	0	0	0	3969	0	121	0,553	15,5
	15-16	11,8	34,2	0	0	0	4151	0	121	0,536	15,7
	16-17	10,7	30,4	0	0	0	3690	0	121	0,579	15,8
	17-18	11,6	33,4	0	0	0	4054	0	121	0,675	15,3
	úč. K3 70 %										

0,88\*Q páry  
pamí ochoz zavřen